



**CARACTERIZACIÓN DE UNA MEZCLA DE MORTERO A BASE DE AZUFRE
NO MODIFICADO (MBA) PARA APLICACIONES INDUSTRIALES**

Autor:

CARLOS ALBERTO ÁLVAREZ

MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
UNIVERSIDAD DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
2018



**CARACTERIZACIÓN DE UNA MEZCLA DE MORTERO A BASE DE AZUFRE
NO MODIFICADO (MBA) PARA APLICACIONES INDUSTRIALES**

Autor:

CARLOS ALBERTO ALVAREZ

Trabajo de investigación para optar al título de Magister en Ingeniería Civil con énfasis en
Ingeniería Estructural

Director:

ANDRÉS GUZMÁN GUERRERO, PhD.

Asesor:

MARGARETH DUGARTE COLL, PhD.

MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
UNIVERSIDAD DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
2018

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	10
1.1	Planteamiento del problema	13
1.2	Justificación.....	16
1.3	Objetivo general y objetivos específicos.....	16
1.4	Hipótesis de investigación.....	27
1.5	Fases del desarrollo de la investigación	28
2	MARCO TEÓRICO.....	30
2.1	Azufre.....	30
2.1.1	Puntos de fusión y endurecimiento del Azufre.	32
2.1.2	Color del Azufre.	32
2.1.3	Viscosidad del Azufre.....	32
2.1.4	Resistencia del Azufre a esfuerzos normales.....	33
2.1.5	Fases del Azufre.....	33
2.1.6	Azufre modificado	36
2.1.7	Azufre no modificado	39
2.2	Calamina.....	40
2.3	Microsílica.....	43
2.3.1	Propiedades físicas.....	44
2.3.2	Composición química	45
2.3.3	La microsílca en el concreto	47

2.3.4	La microsílca en el MBA.....	52
2.4	Mortero a base de azufre (MBA)	53
3	METODOLOGÍA	60
3.1	Revisión del estado del arte.....	61
3.2	Selección, caracterización física y justificación de los materiales utilizados para la mezcla de mortero a base azufre no modificado empleando agregados no pétreos como finos y llenantes	62
3.2.1	MBA	63
3.2.2	Azufre	68
3.2.3	Agregados	68
3.3	Obtención del diseño de la mezcla de componentes para fabricar mortero a base azufre MBA empleando calamina como agregado fino y microsílca como llenante.	72
3.4	Determinación de la resistencia a la compresión, las propiedades químicas (durabilidad) y caracterización macroestructural del mortero a base azufre MBA.	82
3.5	Análisis y evaluación de los resultados obtenidos en el laboratorio.	84
4	RESULTADOS.....	86
4.1	Selección caracterización física y justificación de los materiales utilizados para la mezcla de mortero a base azufre no modificado empleando agregados no pétreos como finos y llenantes	86
4.1.1	Azufre	86
4.1.2	Agregados	86

4.2	Obtención del diseño de la mezcla de componentes para fabricar mortero a base azufre MBA empleando calamina como agregado fino y microsílica como llenante.	93
4.3	Determinación de la resistencia a la compresión, las propiedades químicas (durabilidad) y caracterización macroestructural del mortero a base azufre MBA	95
4.3.1	Determinación de la resistencia mecánica del mortero de azufre – Resistencia a la compresión.....	95
4.3.2	Determinación de las propiedades químicas - Durabilidad	97
4.3.3	Caracterización macroestructural del mortero a base azufre MBA	98
4.4	Análisis y evaluación de los resultados obtenidos en el laboratorio	108
4.4.1	Resistencia a la compresión.....	108
4.4.2	Durabilidad	111
5	CONCLUSIÓN.....	116
6	BIBLIOGRAFÍA	119
7	ANEXOS	131

Lista de tablas

Tabla 1. Modificadores para mezclas en base azufre	37
Tabla 2. Cuadro comparativo de ventajas y desventajas del Diciclopentadieno (DCPD) ...	38
Tabla 3. <i>Propiedades fisicoquímicas de la calamina</i>	42
Tabla 4. <i>Composición química de la calamina</i>	43
Tabla 5. <i>Propiedades de la microsilica</i>	44
Tabla 6. <i>Composición microsilica diferentes autores</i>	45
Tabla 7. Composición microsilica plantas de producción rusas.....	46
Tabla 8. <i>Características de la microsilica</i>	48
Tabla 9. Propiedades mecánicas de mortero, concreto de azufre y concreto hidráulico.....	57
Tabla 10. <i>Propiedades de concreto de azufre</i>	59
Tabla 11. <i>Propiedades de concreto de azufre modificado</i>	59
Tabla 12. Guía general para la resistencia química de morteros de azufre.	64
Tabla 13. <i>Valores límite de las características químicas del ambiente (agua y suelo) que tienen influencia sobre la durabilidad del concreto sujeto a las distintas subclases de exposición ambiental</i>	80
Tabla 14. <i>Designación de tamaño para agregado</i>	81
Tabla 15. <i>Requisitos para masa unitaria de agregados livianos</i>	82
Tabla 16. Caracterización del azufre molido - Resultado de los ensayos en el laboratorio de Monómeros Colombo Venezolanos S.A.	86
Tabla 17. <i>Granulometría calamina</i>	87
Tabla 18. <i>Resultado ensayo de resistencia química calamina</i> (ASTM C1370, 2012).....	88
Tabla 19. <i>Volumen por formaleta para las muestras de las mezclas de mortero de azufre</i>	93

Tabla 20. <i>Porcentaje y peso ajustado de los materiales de la mezcla de mortero de azufre</i>	94
Tabla 21. <i>Peso en gramos de los materiales de mortero de azufre para un cubo de muestra</i> <i>(incluye desperdicio)</i>	94
Tabla 22. Tolerancia permisible por cada edad de ensayo	96
Tabla 23. Caracterización de probetas de MBA.....	99
Tabla 24. Ensayo de Resistencia a la Compresión MBA	108
Tabla 25. Cambio de peso de los cubos durante el ensayo de durabilidad.....	112
Tabla 26. Los cambios dimensionales de las probetas posteriores al ensayo de durabilidad.	113
Tabla 27. Variación dimensional de los lados de las probetas, posterior al ensayo de durabilidad.....	113
Tabla 28. Resistencia a la compresión promedio de cada cubo ensayado	114

Lista de Figuras

<i>Figura 1.</i> Daños en estructuras civiles a causa del ácido sulfúrico	14
<i>Figura 2.</i> Daño a la matriz cementosa de pisos y bases por sulfato de amonio	15
<i>Figura 3.</i> Degradación en estructural civil: Planta de sulfato de amonio	16
<i>Figura 4.</i> Producción mundial de azufre 2015. Fuente: King (2017).	23
<i>Figura 5.</i> Producción histórica de crudo hasta marzo del 2017 (arriba) y proyección a nivel mundial (abajo). Fuente: Global Peak (2018)	25
<i>Figura 6.</i> Almacenamiento de azufre (arriba), azufre en granel (abajo izq.), Muestra de granos de azufre (abajo). Fuente: toma propia	31
<i>Figura 7.</i> Formas alotrópicas comunes del azufre en anillos (arriba) y en cadenas (abajo). Fuente: Housecroft & Sharpe (2012)	34
<i>Figura 8.</i> Procedimiento de pesaje de calamina. Fuente: elaboración propia.....	40
<i>Figura 9.</i> Producción de residuos peligrosos en Colombia. 2012 – 2015. Fuente: Santos Calderón et al.(2016).	42
<i>Figura 10.</i> Muestra de microsílica. Fuente: Holland et al. (2006).....	44
<i>Figura 11.</i> Comparación de granos, granos de cemento (izq.), granos de microsílica (der). (Micrografía por SEM). Fuente: Holland et al. (2006).....	48
<i>Figura 12.</i> Ensayo rápido de permeabilidad a los cloruros (a.v. Ingeniería, Ficha técnica)	50
<i>Figura 13.</i> Resistencia a la compresión (a.v. Ingeniería, Ficha técnica). Fuente: Holland et al. (2006)	50
<i>Figura 14.</i> Probeta de MBA Fabricada en Laboratorio Universidad del Norte. Fuente: toma propia.....	53
<i>Figura 15.</i> Horno (izq.), Ollas para fundir azufre (centro) y formaletas (der.) para fabricar probetas de MBA. Fuente: Toma propia.	56

<i>Figura 16.</i> Ensayo a compresión probetas de MBA. Fuente: Toma propia	66
<i>Figura 17.</i> Pesaje de las muestras. Fuente: toma propia	74
<i>Figura 18.</i> Fundición y mezclado del azufre y agregados. Fuente: toma propia	75
<i>Figura 19.</i> Fusión del azufre. Fuente: toma propia	76
<i>Figura 20.</i> Olla para fundición de azufre. Fuente propia.	76
<i>Figura 21.</i> Llenado de probetas de MBA. Fuente: toma propia.....	77
<i>Figura 22.</i> Probetas finales. Fuente: toma propia	78
<i>Figura 23.</i> Probetas de MBA para ensayo de durabilidad. Fuente: toma propia	78
<i>Figura 24.</i> Pesaje inicial de la muestra. Fuente: toma propia	90
<i>Figura 25.</i> Adición de la solución. Fuente: toma propia.....	90
<i>Figura 26.</i> Homogenización de la mezcla. Fuente: toma propia	91
<i>Figura 27.</i> Sellado y nomenclatura. Fuente: toma propia	91
<i>Figura 28.</i> Cámara húmeda de la muestra a 60° C. Fuente: toma propia	92
<i>Figura 29.</i> Lavado y pesaje final. Fuente: toma propia.....	92
<i>Figura 30.</i> Peso total de la mezcla para 3 cubos de una formaleta. Fuente: toma propia ...	95
<i>Figura 31.</i> Determinación de la resistencia mecánica del mortero de azufre – Resistencia a la compresión (ICONTEC 220, 2012b). Fuente: toma propia	95
<i>Figura 32.</i> Caracterización química de los cubos de muestra. Fuente: elaboración propia..	98
<i>Figura 33.</i> Geometría de probetas de MBA. Fuente: elaboración propia.....	99
<i>Figura 34.</i> Registro fotográfico del procedimiento de ensayo de MBA por durabilidad. Fuente: toma propia	107
<i>Figura 35.</i> Resistencia final a la compresión de probetas de MBA ensayadas.....	115

1 INTRODUCCIÓN

La investigación sobre el mejoramiento de los materiales de construcción y su aplicabilidad en las estructuras civiles cada vez cobra mayor relevancia en la búsqueda de optimizar el comportamiento de las construcciones frente al entorno donde prestan sus servicios. El concreto es uno de los materiales más usados en las obras civiles, por lo que se requiere que su desempeño sea cada vez más alto, y que aporte para que las estructuras sean más eficientes día a día.

Las infraestructuras desempeñan mejor función según la particularidad del material con el que se construyan; de igual manera, a través de la ciencia de los materiales, que estudia la relación entre la estructura y sus propiedades, se puede determinar la durabilidad de los elementos estructurales, que aseguren un mayor tiempo de vida útil.

La durabilidad del concreto se define como la capacidad que tiene el material a través del tiempo de soportar los efectos medioambientales (ACI Committee 318, 2018). La corrosión del acero en el concreto, ya sea por medio de la presencia de cloruros o sales en las obras o por carbonatación del concreto, es solo un ejemplo de estas afectaciones que contribuyen considerablemente a una disminución de la vida útil de una infraestructura (Saraswathy & Karthick, 2014) .

Lo anterior ha generado un interés en el análisis de comportamientos sobre los concretos convencionales ante la exposición de agentes corrosivos, buscando aportar en la reducción de esta problemática, la cual es muy notoria en especial en infraestructuras industriales, debido a la cantidad y tipos de químicos y sustancias a los que se ven sometidas dichas infraestructuras, lo que afecta directamente su durabilidad.

Las estructuras civiles a partir de su construcción comienzan un proceso de desgaste y deterioro por la exposición al medio ambiente y a los diferentes agentes en las que puede prestar su servicio durante su vida útil (Talon, Chevalier, & Hans, 2006), por lo tanto, la durabilidad del concreto como parámetro de medición, ha permitido identificar métodos útiles para la conservación de obras civiles (Neville, 2011).

En la actualidad las empresas de producción de insumos, y en particular las de producción de fertilizantes presentan un problema común sobre la degradación del concreto convencional en contacto con ácidos y sales que se usan como materia prima y durante sus procesos. Los agentes químicos presentes en el proceso industrial entran en contacto con el concreto ya sea directa o indirectamente, en forma líquida, sólida y gaseosa, depositados en estructuras de retención, tanques de almacenamiento o esparcidos eventualmente en pisos, juntas, canales de drenaje, líneas de conducción, bases y demás elementos comunes en las construcciones civiles. Estas condiciones dan como resultado un ambiente agresivo para las estructuras de concreto y acero, tanto en su estado líquido como en sus vapores de equilibrio con el ambiente (Múnera, Álvarez-Láinez, & Ossa, 2010).

El entorno agresivo al que se exponen los elementos construidos con concreto a base de cemento Portland en medios químicos tales como ácidos y sales, es causante de un tiempo de vida menor al esperado en su diseño original y dependiendo del grado de exposición al que se vea sometido durante su vida útil, siendo las partes alcalinas las que causan una

reacción indirecta tales como la reacción álcali-sílice. Los ácidos por su parte reaccionan agresivamente con los materiales básicos, degradando la pasta de cemento hasta consumir la matriz y exponiendo los agregados, los cuales, si tienen orígenes calcáreos, también serán atacados. Adicionalmente al reducirse la alcalinidad, se produce una despasivación del acero de refuerzo existente en el elemento, iniciándose los procesos de corrosión (Medeiros, Gobbi, Réus, & Helene, 2013).

La temperatura del medio circundante, la humedad relativa y la porosidad del elemento, ya sea por fenómenos de capilaridad, absorción o adsorción son los mecanismos para que se produzca la afectación. Existen diferentes formas de enfrentar la afectación por ataques químicos, tales como recubrimientos bituminosos, poliureas o epóxicos entre otros, los cuales tienen un aceptable comportamiento, sin embargo, poseen una vida útil relativamente corta, tienden a cristalizarse y son de alto costo (Helene, 1997).

Se tiene identificado que la necesidad de solución de la problemática presente en plantas industriales es inminente, y son las materias primas que se usan en sus procesos (ácidos y sales minerales), que, al estar en contacto con las estructuras civiles generan un proceso de degradación, cuya velocidad dependerá de los agentes en contacto.

Basados en dicha necesidad, se puede abordar la problemática desde el criterio de la ingeniería civil (infraestructura) donde se diseñe un material que obtenga unas resistencias químicas y mecánicas preestablecidas y que sea capaz de disminuir o evitar la afectación de las estructuras que se ubican en las plantas industriales y son objeto de diferentes tipos de lesiones.

Teniendo en cuenta el anterior problema, se contempla la solución para reducir al máximo el ataque de agentes que afecten las obras civiles en ambientes industriales, como por ejemplo las industrias de fertilizantes, cubriendo la opción estructural e involucrando el enfoque desde

el punto de vista de la durabilidad de los materiales, formulando una mezcla de mortero en base azufre sin modificar, empleando agregados no pétreos, evaluando sus propiedades de durabilidad y de resistencia a la compresión.

1.1 Planteamiento del problema

Los ácidos inorgánicos son altamente agresivos cuando entran en contacto con el concreto a base de cemento portland convencional, el cual es totalmente alcalino, esto debido a la gran capacidad de disociación del ácido representada por un pH cercano a uno (1.0). Dicha agresividad se incrementa al bajar la concentración por dilución con agua, aunado al manejo de temperaturas altas (mayores a 60 grados Celsius) del ácido diluido o a las condiciones de exposición del elemento en estudio (Salinas & Escobedo, 2012).

El resultado negativo que produce el ataque de los ácidos en el concreto, se define principalmente como la reacción de la cal libre como producto de la penetración del ácido, atacando la pasta de cemento y generando una matriz cada vez más porosa y expansiva que hace al concreto más susceptible al ataque (Sánchez de Guzmán, 2001), dejando una apariencia arenosa en las superficies expuestas de los recubrimientos de las canales y los pisos de concreto, erosionando paulatinamente las capas internas del elemento expuesto. Otro tipo de degradación que se presenta es la disolución de los agregados del mortero y concretos hidráulicos de tipo calizo, es decir de origen sedimentario, por su reacción química con el ácido sulfúrico, lo que se aprecia al efervescer el carbonato de calcio al contacto con el ácido generando la degradación en el concreto (Figura 1).



Figura 1. Daños en estructuras civiles a causa del ácido sulfúrico
Fuente: toma propia

Sumado a esto, la inclusión de agregados ricos en calcio, carbonatos de calcio o hidrato de silicato de calcio, hacen al concreto más sensible al ataque químico, puesto que la resistencia de estos componentes al ataque por ácidos es muy baja. Este ataque va debilitando severamente la integridad física de la pasta y su interface con los agregados, lo que genera un deterioro generalizado del concreto (Helene, 1997; Mwangi, Brady, Radonjic, & Thyne, 2018; Salinas & Escobedo, 2012).

En el caso de exposición de los elementos de concreto hidráulico a sulfatos, ocurre una reacción expansiva que conduce al deterioro del elemento (Figura 2). Se debe tener en cuenta que los sulfatos pueden estar en solución ya sean ácidos o alcalinas y el efecto por la exposición es muy similar, por lo tanto, su análisis se realiza por medio del ion sulfato, diluido en una solución (Sánchez de Guzmán, 2001; Salinas & Escobedo, 2012) .



Figura 2. Daño a la matriz cementosa de pisos y bases por sulfato de amonio
Fuente: toma propia

Los sulfatos se acumulan en la superficie del concreto incrementando su concentración, y por ende su potencial de deterioro, lo que se puede observar en una planta de sulfato de amonio (Figura 3); las reacciones químicas involucradas en el ataque por sulfatos se generan al contacto con el aluminato de calcio, el ferro aluminato de calcio y al carbonato de calcio presentes en el concreto, provocando un aumento en el volumen del concreto generando esfuerzos de tracción entre la matriz cementicia y el agregado, produciendo desprendimientos, agrietamientos y ruptura final. En vez de destruir el concreto disolviendo los componentes, los sulfatos reaccionan químicamente con otros componentes que estén en su entorno para formar minerales expansivos tales como la etringita y la taumasita afectando directamente la vida de servicio y la seguridad de las estructuras (Medeiros et al., 2013).



Figura 3. Degradación en estructural civil: Planta de sulfato de amonio
Fuente: toma propia

En este sentido, los daños estructurales en ambientes industriales causados por una amplia gama de ácidos, sales y elementos agresivos, puede reducirse con la aplicación concreta de mortero de azufre, mejorando la resistencia a la compresión y alcanzando las propiedades requeridas en un período de sólo 24 h gracias a su rápido endurecimiento (Vlahovic, Martinovic, Boljanac, Jovanic, & Volkov-Husovic, 2011) y con la ventaja de ser un material reciclado, dado que su producción se obtiene de la desulfuración del gas natural, como subproducto de la producción de petróleo y de la purificación de los gases residuales en la industria del carbón, gracias a la excesiva demanda de azufre existente y los controles de emisiones medioambientales.

1.2 Justificación

El uso de elementos que sean reciclados o de excedentes y desechos de procesos industriales, son una gran oportunidad para ser empleados en la fabricación de materiales que generen un valor agregado al servicio industrial. El concreto reciclado por la trituración de escombros de concreto es uno de los ejemplos de materiales reutilizados, utilizándose incluso para el

tratamiento de aguas subterráneas ácidas (Jiménez & Moreno, 2015), funcionando como material reactivo en barreras reactivas permeables, el cual tiene propiedades para neutralizar aluminio y hierro disuelto en el agua (Regmi, Indraratna, Nghiem, Golab, & Prasad, 2011). Un ejemplo adicional son los ladrillos reutilizados, que por ser de material puzolánico mejoran la resistencia del concreto a largo plazo (Chakchouk, Samet, & Mnif, 2006).

Otro material, subproducto del proceso de producción del petróleo y que es usado para la durabilidad de los concretos, es el azufre, con características sobresalientes y de amplio estudio, utilizado desde 1859 como material cementante (Wright, 1859). Posteriormente se intensificó su estudio y aplicación en variadas estructuras, como tuberías de desagües, fundaciones, diques y estanques entre otras muchas más (Kobbe, 1924).

Desde el siglo XVII el azufre fundido ha sido utilizado para determinar una serie de funciones y usos en áreas diversas. En el año 1859 se abre campo el concreto de azufre, cuando Wright describe, en una patente de Estados Unidos, las propiedades cementantes del azufre. En esa época el uso del azufre no estaba muy correlacionado con la construcción, sin embargo, durante la Primera Guerra Mundial la demanda aumentó, generando el doble de la producción de azufre en América y realzando el interés por desarrollar nuevas aplicaciones con dicho material (Gracia, Vázquez, & Carmona, 2004). Entre 1920 y 1960 la información asociada a los compuestos de azufre es escasa por los altos costos del material, como mencionan Barcia & Casanova (1986), sin embargo con la aparición del estudio de Bacon y Davis (1921) sobre el uso del azufre en la producción de materiales de construcción, es cuando se realizan los primeros ensayos de este tipo de materiales con la fabricación de morteros con 40 % de azufre, los cuales serán resistentes a los ácidos con buenas propiedades mecánicas (Bacon & Davis, 1921).

Como ya se mencionó, Kobbe (1924) propuso el empleo de azufre en revestimientos de concreto en fundaciones, diques, tuberías de desagüe, estanques y ensayó agregar a la mezcla contenido de plastificantes, fibras naturales, relleno fino y colorantes; de estos aditivos algunos de los plastificantes probados aún se siguen utilizando, como es el caso del dicitopentadieno, monómeros del estireno, polisulfuros aromáticos y alifáticos. Con el paso del tiempo y las pruebas realizadas se encontró que el mortero desarrollado por Bacon y Davis sufrió algunos cambios de volumen y presentó fisuras bajo ciclos térmicos, generando con eso pérdida de resistencia a la flexión (Bacon & Davis, 1921). Una de las características del azufre cuando se eleva su temperatura de fusión es su cambio de volumen y comportamiento quebradizo, por lo que Duecker (1934) modificó el azufre químicamente con el polímero producido por Thiokol® (polisulfuro polimérico), el cual retrasa el cambio volumétrico y la pérdida de resistencia, solucionando los problemas de agrietamiento.

Posteriormente, Payne y Duecker (1940) trabajaron con modificadores de azufre usados con anterioridad por Davis y Duecker, para lograr tener cementos de azufre más estables, conduciendo así a una mayor aceptación industrial e investigación del producto. Ese mismo año aparece también McKinney (1940), estudiando y describiendo métodos para conocer las características y propiedades de los materiales que conforman los morteros de azufre. Él describió métodos de prueba a través de su investigación en la *Mellon Insitute*, y sobre los cuales se han adoptado dentro de las especificaciones establecidas por la *American Society for Testing and Materials* (ASTM) para la industria química - mortero resistente de azufre. Pero es hasta 1960 donde se le presta atención nuevamente al azufre ya que en esos años hubo una notable inversión en la protección del medio ambiente, particularmente en los Estados Unidos y Canadá, tratando de aminorar la emisión de gases a la atmósfera (dióxido de azufre SO_2 , hexafluoruro de azufre SF_6 y sulfuro de hidrógeno H_2S), en el proceso de

fundición de azufre generando el interés de usar azufre como aglutinante estructural e iniciando una amplia investigación sobre sus propiedades y utilidades (Dale & Ludwing, 1965).

A partir de 1960, el azufre toma auge con la creación de *The Sulphure Institute* (TSI), el cual fomentó la investigación sobre el material como cementante (Fike, 1976).

Ya en 1970 se obtienen las primeras conclusiones de trabajos sobre la gradación de las mezclas con azufre, y a partir de la recopilación de trabajos de Dale y Ludwing (Dale & Ludwing, 1965), respaldada por patente (McBee & Sullivan, 1977) y de autores como McBee y Sullivan, Crow y Bate, (1970), se tiene la demostración de las excelentes propiedades de resistencia que tiene los concretos de azufre cuando son preparados a partir de azufre y mezclas de agregados. En 1972, el *Bureau of Mines* pronosticó que para el año 2000, en Estado Unidos, el excedente sería de 15 a 20 millones de toneladas anuales de azufre. Esto, motivó que a partir de 1980, el Instituto del Azufre, orientara y fomentara la investigación referente a nuevos usos del azufre buscando extender su aplicación.

Mc Bee y Sullivan (1985) lograron identificar nuevos usos que se describen a continuación:

- Recubrimiento de fertilizantes para controlar su dosificación en los suelos.
- Pinturas para señalización de carreteras.
- Sustitutos de morteros en construcción
- Recubrimientos para protección de concretos usados en: industria química, procesamiento de minerales, desalinización de agua.
- Estabilización de residuos de procesamientos de minerales y de otros desechos industriales.
- Consolidación de suelos.

- Construcción de estanques abiertos para almacenamiento de líquidos.

Aparece además la importancia de los materiales impermeables y extremadamente resistentes al ataque por ácidos y sales minerales. Con este objetivo, el *American Concrete Insitute* (ACI) desarrolla una guía en 1993: Guía de Mezcla y Colocación de concreto de azufre en la construcción (ACI 548.2R-93/98, 1993), para el uso como material resistente e impermeable en situaciones donde el concreto de cemento Portland falla, como lo es en ambientes ácidos o salinos. En la actualidad se han desarrollado otras guías para especialistas en cementos alternativos como la ACI ITG-10R-18. (2018).

Una de las líneas desarrolladas en la investigación del azufre es la de obtener características similares a las que se obtienen con el concreto y el mortero a base de cemento Portland, pero con un mejoramiento en las propiedades mecánicas y en su durabilidad. Para este fin se han fabricado concretos y morteros de azufre con una gran variedad de materiales, utilizando en algunos casos, aditivos modificadores que brindan a la mezcla un comportamiento particular (Owaid, Hamid, & Taha, 2012).

Es a partir de la década del año 1960 que se ha desarrollado a nivel mundial un gran esfuerzo investigativo para obtener materiales de construcción a base de azufre. Todo el desarrollo generado alrededor del azufre ha pasado por distintas aplicaciones, desarrolladas por medio del uso de diferentes adiciones y mezclas, que permiten su uso como material cementante en la fabricación de morteros y concretos, capaces de brindar mayor durabilidad frente a los agentes medioambientales (Khademi & Sar, 2015).

Basados en el azufre, se desarrolla el concreto de azufre el cual es un material termoplástico, es decir que se deforma y vuelve flexible al aumentar la temperatura y que se endurece al enfriarlo, preparado con azufre y agregados de diversos minerales el cual se solidifica y adquiere resistencia rápidamente (Malhotra, 1979; Khademi & Sar, 2015). En el caso de este

concreto, se ha estudiado ampliamente el comportamiento de aditivos modificadores, lo que se explicará con detalle en el marco teórico. Los aditivos modificadores logran cementos de azufre más estables y también la concepción de distintas cantidades de agregados gruesos y finos para una mayor resistencia de la mezcla respaldada por patente (McBee & Sullivan, 1977) y la literatura (McBee & Weber, 1990; Mohamed, 2006; Vroom & Whitmore, 1991). A su vez se han realizado estudios para poder controlar el comportamiento cristalino del azufre y aprovechar sus características de durabilidad sin necesidad de aditivos, también llamado azufre no modificado, con el uso de materiales que sean de fácil consecución en el entorno de fabricación e implementación (Mohamed, 2006).

Prácticamente, la gran mayoría de estos trabajos se han hecho en países industrializados como Corea (Lee, Hong, Park, & Ko, 2014), Canadá (Loov, Vroom, & Ward, 1974; Mohamed, 2006; Vroom & Whitmore, 1991) y Estados Unidos, patente (McBee & Sullivan, 1977) y autores McBee y Sullivan (1977), Crow y Bates (1970) y McBee y Weber (1990). Sin embargo, también se han realizado algunos estudios en países latinoamericanos como Chile (Gracia et al., 2004) y Colombia (Dugarte Coll & Soto Balán, 2004).

Por otra parte, la producción de una tonelada de cemento Portland emite entre 0.2 y 1.0 tonelada de CO₂ (Gartner, 2004), dando pie a considerar que las alternativas de solución para el manejo de la degradación del concreto en ambientes agresivos deben incluir este punto ambiental y originar estrategias razonables (Xiaoming Wang, Nguyen, Stewart, Syme, & Leitch, 2010). El azufre se origina como un subproducto de procesos de refinación de petróleo, es decir no es producido bajo un específico fin, es más bien a partir de su existencia que se promueve la utilización del mismo. Desde este punto de vista, la utilización del azufre reduciría la acumulación de material otorgándole un uso como un material constituyente de

mezclas de mortero, y a su vez brindaría una solución a la provisión de azufre que se tiene por su fuente de origen.

Según la Unidad de Planeación Minero Energética, UPME (2016), la industria del cemento es la responsable del 10% de las emisiones mundiales de dióxido de carbono. El mortero de azufre, por su lado, busca considerarse una alternativa sostenible con el medio ambiente, de modo que disminuya estos impactos generados por el hombre, en el área de la construcción. El mortero a base de azufre (MBA) es una alternativa ambiental, ya que los rendimientos en el proceso de producción del cemento son aproximadamente del 7 % de las emisiones totales de CO₂ (Shin et al., 2014). Por tanto, el azufre se puede direccionar a una renovación sostenible, partiendo de un residuo que se convierta en un material de construcción ambientalmente prometedor y que a su vez pueda sustituir al cemento Portland en diversos productos de construcción (Broere, 2008; Moon, Kalb, Milian, & Northrup, 2016).

Ya en el año 2000 se evidencia que 1.2 millones de toneladas de azufre son generadas anualmente en Corea, y casi el 90 % de la cantidad total de azufre se originó a partir de la desulfuración en procesos de refinación del petróleo (Shin, Kim, Gwon, & Cha, 2014).

En 2011 la producción mundial de azufre fue de aproximadamente 69 millones de toneladas y a 2015 fue de 70,3 millones de toneladas (Apodaca, 2016; King, 2017; Shin et al., 2014; Simoes, 2017) (Figura 4).

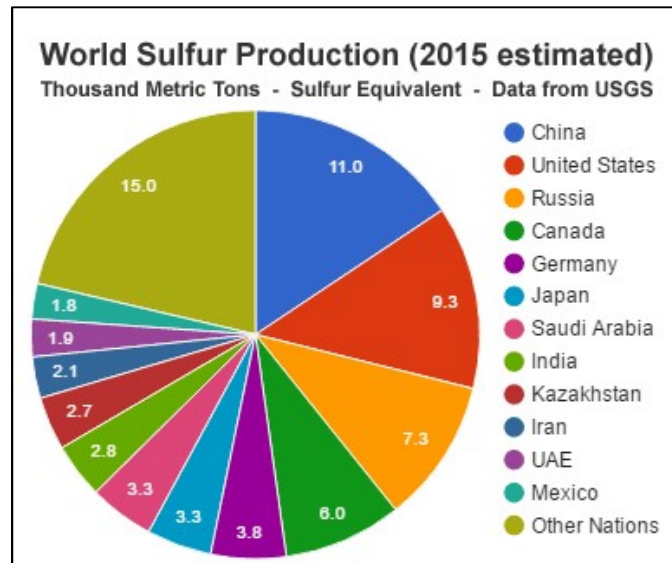


Figura 4. Producción mundial de azufre 2015. Fuente: King (2017).

La producción de azufre va ligada a la del petróleo que en los últimos años ha venido en aumento, ya sea por la refinación de petróleo y gas natural, por la explotación de minas de azufre, la refinación de gas ácido, la refinación del cobre en las minas, también por la refinación de carbón e incluso los procesos de eliminación de sulfuro de hidrógeno (Kalb, Vagin, Beall, & Levintov, 2004; Behfarnia & Salemi, 2013). De los procesos mencionados, quedan grandes remanentes que no logran utilizarse y podrían disponerse para ser usados en concretos y morteros poliméricos en base azufre, como reemplazo del cemento y el agua en el concreto cumpliendo un papel de aglutinante (Shin et al., 2014).

Algunas industrias han trabajado en la aplicación de los concretos y morteros poliméricos en base azufre, como elementos de construcción prefabricados y bordillos de carreteras, también en la construcción de instalaciones de manejo de drenajes y aguas servidas, en las cimentaciones de tipo básico, en la construcción de tanques contenedores de ácido y para la construcción de plataformas de concreto convencional (Loov et al., 1974; Gracia et al., 2004;

Orlowski, Leszczewski, & Margal, 2004; Rizwan, David, Sheela, & Raj, 2017). Adicionalmente, los usos de concretos y morteros modificados se aprecian en plantas de tratamiento de aguas residuales, en elementos sometidos al efecto permanente del ambiente marino, en canales de drenaje, tuberías de alcantarillado, pavimentación de caminos y otras numerosas aplicaciones (Vlahovic et al., 2011).

El mortero de azufre es un material de construcción relativamente nuevo que posiblemente puede sustituir el concreto convencional para convertirse en un aglutinante en diversas aplicaciones, de nivel intermedio y no estructural, dado a su ablandamiento a temperaturas cercanas a los 100 °C. La experiencia contemporánea en todo el mundo muestra al concreto a base de azufre como un aglutinante con ventajas químicas y físico-mecánicas significativas en comparación con el concreto de cemento Portland (Vlahovic et al., 2011; Khademi & Sar, 2015) y como un poderoso contenedor de desechos ambientales, tales como plomo, mercurio y elementos nucleares (Lin, Lai, & Chian, 1995; Fuhrmann, Melamed, Kalb, Adams, & Milian, 2002; Svensson & Allard, 2008; López, Alguacil, Rodríguez, Sierra, & Millán, 2015).

De aquí y bajo las necesidades que se tiene, nace la idea de utilización del azufre, dado que una de sus características principales es la muy baja permeabilidad al agua, entre el 2.47% al 5.31% de absorción dependiendo de los agregados y llenantes que se usen, gracias al efecto hidrofóbico del azufre, por lo que se puede utilizar como material de impermeabilización (Vlahovic et al., 2011).

En esta instancia, es necesario resaltar que Latinoamérica posee las reservas de crudos pesados más grandes del mundo, iniciando por Venezuela, que anteriormente se pensaba sería el país en vías de desarrollo más afectado por los excedentes de azufre; sin embargo, de acuerdo a la Agencia Internacional de Energía es probable que la capacidad de Venezuela

caiga a 1.38 millones de barriles al día para finales de este año (Revista Portafolio, 2018), la más baja desde 1950. La producción en dicho país se ha reducido a la mitad en los últimos 20 años.

Por otro lado, la producción de azufre se ha aumentado debido a que los precios se han mantenido relativamente estables, muy a pesar de que el precio del petróleo ha sufrido una de sus peores caídas en los últimos años, la producción mundial de petróleo, al igual que la de azufre también ha venido ascendiendo (Global Peak, 2018) (Figura 5).

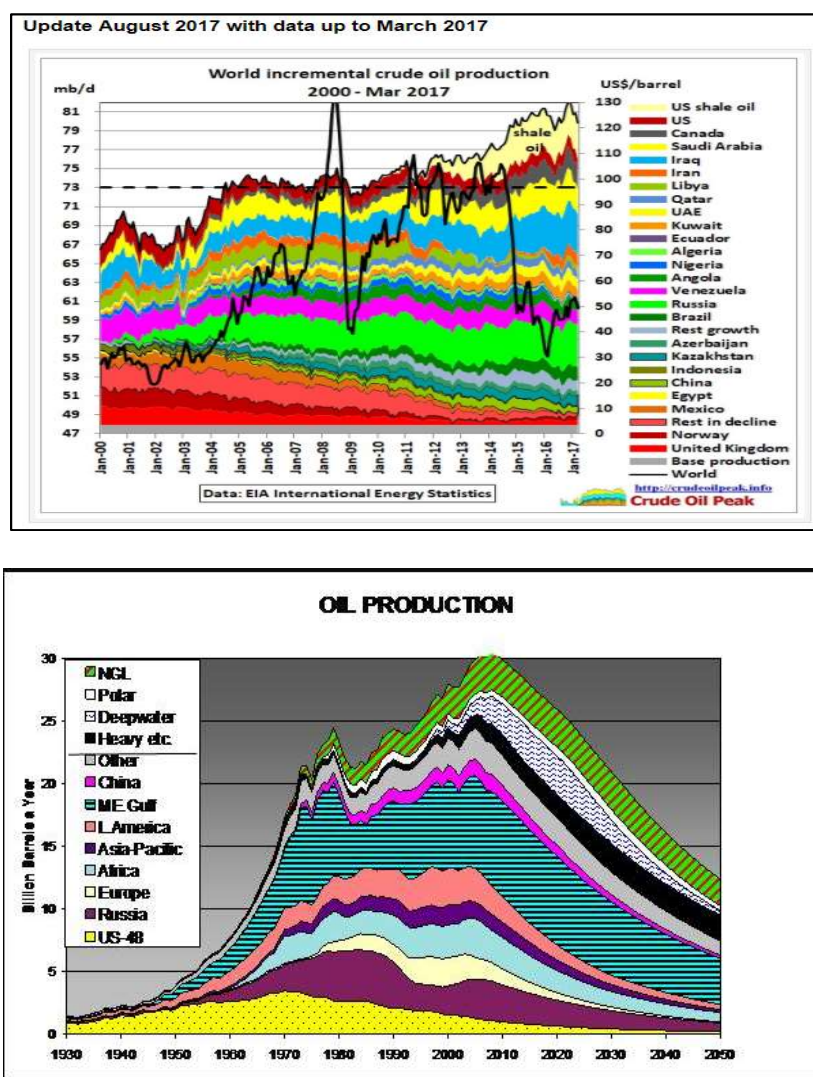


Figura 5. Producción histórica de crudo hasta marzo del 2017 (arriba) y proyección a nivel mundial (abajo). Fuente: Global Peak (2018)

Como se mencionó, la producción mundial de azufre está en el orden de las 70 mil toneladas métricas, (King, 2017), contrastando con la producción colombiana que asciende a 17600 toneladas, sin embargo la producción de azufre de alta pureza, la cual se utiliza para producir el MBA es solo del orden de 2200 toneladas (UPME, 2016). En este momento se importa azufre de Venezuela, quien por la convulsión política por la que está pasando, genera una cantidad de azufre que no puede colocar en el mercado, a precios relativamente bajos (Barros, 2018).

Sin embargo, con la entrada en producción de la refinería de Ecopetrol en Cartagena “Reficar”, se están produciendo alrededor de 20 toneladas mensuales de azufre líquido de alta pureza, sin mercado inmediato, por lo tanto se están buscando mercados para la venta, por lo que se ha priorizado la venta a industrias de fertilizantes locales, para ser utilizado en sus procesos de producción (Primera, 2017).

La industria química es incapaz de absorber los grandes excedentes de azufre y se hace imperiosa la búsqueda de nuevas fuentes de consumo. El uso exitoso del azufre como material de construcción puede aliviar en parte las dificultades de almacenamiento de los excedentes de la producción mundial. Adicionalmente, el MBA tiene una resistencia excepcional a la influencia de muchos ácidos y sales, incluso en concentraciones muy altas, lo que permite su uso en ambientes agresivos extremos (Vlahovic et al., 2011).

1.3 Objetivo general y objetivos específicos

El Objetivo general de la investigación consiste en:

Caracterizar una mezcla de mortero a base de azufre sin modificar empleado agregados no pétreos, obteniendo parámetros de resistencia a la compresión y durabilidad superiores a las de un concreto hidráulico de $f'c$ de 21 MPa.

En correspondencia con el objetivo general se establecieron los siguientes objetivos específicos:

- Formular una mezcla de mortero a base de azufre empleando calamina y microsílica como llenantes a partir de investigaciones previas en el área.
- Someter muestras del mortero a base azufre a ensayos de durabilidad en el laboratorio, que simulen condiciones de servicio típicos en procesos industriales con soluciones agresivas.
- Determinar la resistencia a la compresión del mortero a base azufre, luego de su exposición a sustancias agresivas que se determinan en la NTC 5551 (2007) para el concreto convencional.
- Evaluar la resistencia a la compresión de la mezcla de mortero a base de azufre formulada, respecto a la resistencia a la compresión de un concreto convencional con $f'c$ de 21 MPa en 24 horas.

1.4 Hipótesis de investigación

Para dar respuesta a la problemática expuesta anteriormente, se formuló la siguiente hipótesis de investigación:

La mezcla de mortero a base de azufre no modificado (MBA) empleando calamina y microsílica, presentará parámetros de resistencia a la compresión y durabilidad superiores a la de un concreto hidráulico de $f'c$ 21 MPa.

La mezcla formulada podrá ser usada como alternativa en la construcción, protección y recuperación de infraestructura en ambientes industriales.

1.5 Fases del desarrollo de la investigación

El trabajo investigativo se realiza en dos fases generales, una de tipo diagnóstico-analítico y otro de tipo experimental. En la fase diagnóstica-analítica se realiza una revisión literaria del estado del arte del tema tratado, se revisa documentación especializada y las tendencias y avances del tema tratado, se describen y analizan los materiales propuestos y se formula la mezcla de mortero a base de azufre empleando calamina y microsílica como agregado fino y llenantes respectivamente. En la fase experimental se someten muestras del mortero a base azufre a ensayos de compresión y durabilidad en el laboratorio y se analiza los resultados respecto a un concreto hidráulico de $f'c$ de 21MPa, el cual está normalizado en la NTC 5551 (2007).

La presente investigación se desarrolla en los siguientes capítulos:

Capítulo 1: Capítulo de Introducción. Se desarrolla la introducción, planteamiento del problema, su justificación, se establece el objetivo general y los objetivos específicos, se formula la hipótesis y se enuncian las fases de desarrollo de la investigación.

Capítulo 2: Capítulo de revisión de la literatura. Se hace una revisión del estado del arte de la investigación, se analizan las tendencias y avances que han ocurrido alrededor del tema, se construye un marco teórico que describe los materiales y su impacto en el desarrollo del mortero.

Capítulo 3: Capítulo de metodología. Se establece la metodología de la investigación, se explica cómo se desarrolla la misma, se describe el procedimiento empleado para la

caracterización de la mezcla de mortero a base de azufre, cómo se construyeron las muestras, los ensayos a los que fueron sometidos y cómo se analizarán los datos.

Capítulo 4: Capítulo de resultados. Se obtienen los resultados aplicando la metodología expuesta en el capítulo 3, se describen, evidencian y estudian los resultados obtenidos según las pruebas de laboratorio desarrolladas.

Capítulo 5: Capítulo de discusión y conclusiones. Se analizan e interpretan los resultados obtenidos en función de los objetivos planteados, se exponen los aportes obtenidos y se dan las recomendaciones pertinentes.

Al final del documento se relaciona la bibliografía consultada, y se adjuntan un grupo de anexos como complemento a los resultados expuestos.

El alcance de esta investigación se centra en la caracterización de una mezcla de mortero a base azufre sin modificar, empleando agregados no pétreos, y someter muestras de la misma en el laboratorio a agentes químicos agresivos, basados en la norma técnica NTC 5551 (2007) para concretos hidráulicos, y así determinar su durabilidad y resistencia a la compresión.

En síntesis, con base al conocimiento de distintas tecnologías de dosificaciones y análisis en mezclas de azufre (Lee et al., 2014), se plantea en la presente investigación desarrollar y producir un mortero de azufre sin modificar, usando el azufre como material cementante, calamina como agregado fino y microsílica como llenante mineral de intersticios. El propósito es analizar el comportamiento de la mezcla de todos estos materiales y evaluar si ofrecen mejor resistencia tanto a la compresión como a agentes químicos, con el fin de lograr la concepción de una mezcla más ligera y eficaz, siendo económicamente viable, evidenciado en la utilización de los productos que la compongan y obteniendo un mortero con resistencia a la compresión y durabilidad superior al del concreto convencional de resistencia a la compresión, ($f'c$) igual a 21 MPa.

2 MARCO TEÓRICO

El mortero es un compuesto de conglomerantes inorgánicos, agregados finos, agua y en ciertas ocasiones aditivos, que sirven para pegar elementos de construcción tales como ladrillos, piedras y bloques de concreto. Adicionalmente, es usado para rellenar los espacios que quedan entre los bloques y como revestimiento de paredes, entre otras aplicaciones convencionales. Con base en las características generales explicadas, se propone una mezcla de mortero a base de azufre capaz de mejorar el estado de las estructuras civiles expuestas a agentes químicos, ofreciendo la resistencia adecuada sobre elementos de construcción, por ello, se requiere una revisión física del mortero que incluyan las características propias de cada material que lo conforma, con el fin de comprobar su verdadera utilidad.

Las características intrínsecas de los materiales que conforman el mortero le ofrecen un valor agregado al conjunto, puesto que responden a las necesidades que requieren las estructuras en servicio durante su vida útil. En este caso los elementos constituyentes del mortero a base azufre son materiales subproductos de procesos industriales (azufre y calamina), reduciendo el uso de materia prima convencional y a su vez protegiendo el medio ambiente (García-Díaz et al., 2013) .

A continuación, se determinan las características de cada uno de los materiales utilizados en el desarrollo de la investigación hasta llegar a la conformación de la mezcla del MBA.

2.1 Azufre

Es un elemento no metálico, insípido, inodoro, de color amarillo pálido, ubicado en el grupo 16 (o VIA) del sistema periódico. Su número atómico es 16 y su masa atómica 32.064 Uma. Es un elemento reactivo que combina con todos los demás elementos excepto gases nobles,

oro y platino. Es de origen natural como subproducto de materiales orgánicos descompuestos, y se obtiene a partir de la destilación del petróleo crudo (Mohamed & El-Gamal, 2010). Además, es reconocido por ser uno de los elementos más abundantes, al ocupar el lugar número 13 en cantidad sobre la corteza de la Tierra (McBee, Sullivan, & Jong, 1985) (Figura 6).



Figura 6. Almacenamiento de azufre (arriba), azufre en granel (abajo izq.), Muestra de granos de azufre (abajo). Fuente: toma propia

2.1.1 Puntos de fusión y endurecimiento del Azufre.

El azufre tiene diferentes puntos de fusión y endurecimiento, dependiendo de las formas alotrópicas u ordenamientos moleculares que presente en el momento de fundir y de la velocidad de calentamiento. El endurecimiento del azufre por su parte se hace de manera natural al regresar de la temperatura de fusión, siendo este proceso una degradación de los arreglos alótropos que se hayan formado en su estado líquido y de la velocidad de enfriamiento, formando nuevos arreglos moleculares.

La densidad del azufre también varía según su ordenamiento molecular, encontrando densidades máximas en el azufre en estado natural u ortorrómbico de 2.069 g/cm³ hasta densidades mínimas de 1.94 g/cm³ para el azufre fundido o arreglo monoclinico (Mohamed & El-Gamal, 2010).

2.1.2 Color del Azufre.

El color del azufre varía también acorde al arreglo molecular y a la velocidad y temperatura de calentamiento o de enfriamiento, encontrando coloraciones entre rojo pálido y anaranjado para un arreglo S6, hasta un amarillo limón para un arreglo S18, pasando por amarillo verdoso en arreglos S10, amarillo profundo en arreglos S9, amarillo y amarillo suave en arreglos S8 y S7, amarillo brillante en arreglo ortorrómbico, entre otras coloraciones (Meyer, 1976; Steudel, 2003).

2.1.3 Viscosidad del Azufre.

La viscosidad del azufre en su estado líquido disminuye con el aumento de la temperatura, presentando un rango donde el cambio es considerable, pasando de 7 centipoises a

temperaturas cercanas a 160° C hasta 932 poises a 190° C aproximadamente, donde se presenta la máxima viscosidad, a partir de esta temperatura decrece nuevamente, los cambios de viscosidad están relacionados con la formación de cadenas poliméricas y la disminución de anillos estables tipo S8 (Cates, 2007).

2.1.4 Resistencia del Azufre a esfuerzos normales.

Dale and Ludwing (1965) definieron en 1965 que la resistencia de una muestra de azufre a esfuerzos de compresión, varían entre 12.6 MPa a 23.1 MPa, dependiendo directamente de la pureza del azufre como de la historia térmica de la muestra. La resistencia a la tensión está relacionada con la conformación molecular al momento del calentamiento y endurecimiento al enfriar, controlando estas características las resistencias pueden estar del orden de 0.41 MPa a 98 MPa, lo que es un rango amplio de valores, que dependen de un control estricto de la formación molecular (Jung, Lee, & Song, 2014). La forma y pureza del azufre es relativamente de menor importancia, siempre y cuando las impurezas no representen más del 4% de arcillas o materiales expansivos (Dugarte Coll & Soto Balán, 2004; Broere, 2008; Moon et al., 2016).

2.1.5 Fases del Azufre

Vlahovi'c, et al. (2011) determinó que el azufre aparece en alrededor de 30 diferentes modificaciones alotrópicas. La literatura indica que el azufre presenta varios procesos de formación a partir de cambios de temperatura, reacciones intramoleculares e intermoleculares de los componentes del azufre, y los procesos de enfriamiento y solidificación del mismo; por eso se remite a dar a conocer las distintas fases, nombres y

efectos del azufre en base a las definiciones y seguimiento del azufre como material de construcción por Barcia & Casanova (1986).

El azufre presenta diferentes formas alotrópicas o de orientación molecular, a saber las más estables, S₆, S₇, S₈, S₉, S₁₀, S₁₁, S₁₂, S₁₈, S₂₀, cada uno formando anillos con diferente número de moléculas, diferente distancia entre moléculas y una orientación particular, lo que genera propiedades particulares a cada arreglo molecular, sin embargo, los arreglos moleculares se pueden encontrar desde dos moléculas S₂, hasta cadenas de moléculas S_∞, las cuales son menos estables (Figura 7).

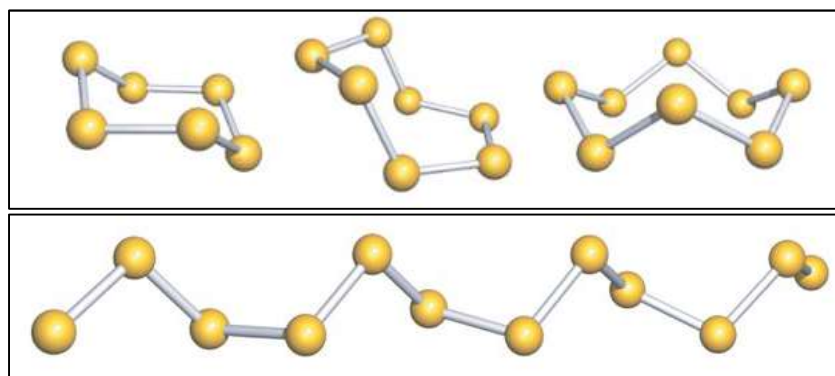


Figura 7. Formas alotrópicas comunes del azufre en anillos (arriba) y en cadenas (abajo).
Fuente: Housecroft & Sharpe (2012)

Todas las formas de azufre son insolubles en agua y las formas cristalinas son solubles en bisulfuro de carbono. Las características físicas del azufre sólido van ligadas a su forma alotrópica como se mencionó anteriormente y en ciertas ocasiones a su comportamiento térmico. El azufre presenta dos formas cristalinas o alotrópicas claramente diferenciadas, la configuración en anillos ya sea ortorrómbica, llamada azufre α o monoclinica, azufre β y la amorfa o en cadena μ , que ocurre cuando luego de fundir el azufre, se enfría de manera rápida

sin darle tiempo de cristalizarse y de formar anillos, generando cadenas alargadas, que se aprecian como una sustancia pegajosa y elástica (Housecroft & Sharpe, 2012).

El azufre α , como el β , están formado por anillos de 8 moléculas y se diferencian en la forma como se empaquetan cristalinamente. De las dos estructuras moleculares del azufre, la más estable es la ortorrómbica, la cual se encuentra como piedras o cristales amarillos en las zonas volcánicas (Barcia & Casanova, 1986; Steudel, 2003; Housecroft & Sharpe, 2012).

El paso del azufre de ortorrómbico (azufre α) a transformarse en azufre monoclinico (azufre β), ocurre en la transición de temperatura entre 94.5 °C y 120 °C, el cual presenta una forma cristalina alargada y transparente, con formas geométricas tipo agujas.

Cuando el azufre rómbico $S\alpha$ se funde a 115.21 °C, forma el líquido móvil amarillo pálido $S\beta$, que se vuelve oscuro y viscoso a 160 °C formando azufre amorfo ($S\mu$). (Vlahović, Savić, Martinović, Boljanac, & Volkov-Husović, 2012)

Todos estos factores, ya sea la formación de las formas moleculares, los ordenamientos cristalinos y por supuesto el azufre recién solidificado, dependen de lo siguiente:

- La temperatura desde la cual se inicia el enfriamiento de la masa fundida.
- El tiempo que se mantuvo a la temperatura desde la cual se enfría.
- La velocidad de enfriamiento.
- La temperatura hasta la cual se enfría.
- El tamaño de la muestra y sus posibilidades de efectuar cambios de energía con el medio ambiente.
- La pureza del azufre.

Al controlar estos factores se pueden retardar o acelerar los cambios de fases que producen disminución de la resistencia mecánica. (Barcia & Casanova, 1986).

2.1.6 Azufre modificado

Las propiedades mecánicas del azufre en estado sólido se pueden mejorar agregando algunos compuestos conocidos como plastificantes o modificadores; estos mejoran la elasticidad y/o retardan la transición rómbica a monoclinica (Mohamed & El-Gamal, 2010).

El azufre en sí tiende a unir con enlaces covalentes una gran cantidad de moléculas pequeñas (polimerizarse), mientras que la modificación química aumenta esta tendencia o prolonga el tiempo requerido para la polimerización. Excepto la prevención de la transformación de azufre de monoclinica a la forma ortorrómbica, el grado de polimerización de azufre se incrementa y se crean cadenas largas debido a la modificación (Vlahovic et al., 2011).

Sin embargo, el concreto hecho con azufre elemental tiene limitaciones frente al modificado, ya que tiene propiedades inferiores, como menor resistencia física y una mayor fragilidad que los concretos en base azufre modificado. Con el fin de superar estos inconvenientes, se han inventado varios tipos de modificadores (Shin et al., 2014).

El azufre modificado se prepara agregando el plastificante al azufre fundido y esperando que se produzca la reacción y se alcance el equilibrio. Los plastificantes son sólidos de bajo punto de fusión o líquidos de alto punto de ebullición que al ser agregados a un material rígido le confieren flexibilidad. El plastificante reacciona químicamente con al azufre, ya sea por mezcla o por acción combinada. El material resultante en estado sólido no presenta un carácter cristalino, no es quebradizo y no tiene tendencia a desintegrarse (Khademi & Sar, 2015).

Cuando el material resultante se somete a un esfuerzo mecánico, se genera un rango de deformaciones plásticas irreversible. En general la dureza decrece cuando se aumenta la cantidad de plastificante (Barcia & Casanova, 1986).

La Tabla 1 presenta algunos modificadores usados para controlar la estructura cristalina en el azufre y permitir una estructura estable (azufre Ortorrómico) de forma permanente:

Tabla 1. Modificadores para mezclas en base azufre

Modificador	Autor	Año
Olefina monosulfuro	Pryor	1962
Olefina polisulfuro (Tiocol)	Vroom et al.	1974
Diciclopentadieno (DCPD)	Currel	1976
	Leutner & Diehl	1977
	Feldman	1984
Diciclopentadieno + Estireno	Mc Bee et al.	1977
	Blight et al.	1978
Petróleo crudo + Glicol	Bordoloi & Pearce	1978
	Guillot et al.	1980
Ácido fosfórico	Woo	1983
Organosilano	Nimer & Campbell	1983
	Beaudoin & Feldman	1984
	McBee & Sullivan	1982
5-etilideno-2-norborne/ 5-vinil-2nbornenen	Shell International B.V.	2006
Bitumen	Mohamed & El Gamal	2006
	Mohamed & El Gamal	2008
DCPD/ DCPD + Ciclopentadieno + dipenteno	Lin et al.	1995
	Dugarte & Soto	2006
	Behfarnia et al.	2010
	Vlahovic et al.	2011
	Khademi & Kadazar	2015
	Moon et al.	2015
Butanieno + Estireno	Dehestani et al.	2017

Fuente: elaboración propia

El modificador más estudiado es el diciclopentadieno (DCPD) que ha permitido la producción de concretos de azufre de buenas propiedades mecánicas y notable estabilidad química (Dehestani et al., 2017). El DCPD se agrega al azufre líquido, se espera que reaccione y se vacía en los moldes. El azufre al enfriarse no experimenta el cambio

monoclínico a rómbico. Los productos están formados de cadenas poliméricas que encierran unidades de 8 átomos de azufre, azufre amorfo y cristales de azufre monoclínico.

Los modificadores tienen diferentes reacciones sobre el azufre, en el caso del (DCPD) mejora las propiedades fisicoquímicas del azufre elemental, pero a su vez presenta desventajas. La Tabla 2 hace referencia de algunas de estas características mencionadas por A. Mohamed & El-Gamal (2010).

Tabla 2. Cuadro comparativo de ventajas y desventajas del Diciclopentadieno (DCPD)

Ventajas del diciclopentadieno	Desventajas del diciclopentadieno
Se mezcla fácilmente con el azufre líquido.	La relación con el azufre es exotérmica y difícil de controlar a temperaturas superiores a los 140°C. Aumentando la viscosidad y dificultando el manejo.
Aumenta la resistencia a la compresión del azufre.	Un 50 % de DCPD conduce a una máxima resistencia a la compresión, pero no estabiliza completamente el azufre monoclínico, de manera que para tiempos largos se pueden producir cambios de fases que disminuyan las propiedades mecánicas.
Hace menos quebradizo a la estructura de azufre.	Se debe controlar bien la temperatura de los agregados para que no alteren la temperatura de reacción.
Reduce la combustibilidad.	
Aumenta la resistencia a la acción de soluciones ácidas y salinas	La dosificación del DCPD, las condiciones de reacción y la proporción en que se incluyen otros agregados es función de las propiedades que se quiera conferir al producto final de acuerdo al uso propuesto, por lo que se requiere un control estricto de las variables.
Los productos finales son inodoros.	La calidad del producto no es uniforme debido a la dificultad para mantener uniforme y controlar la reacción en una gran masa de viscosidad variable, por lo que la producción en gran escala requiere alta supervisión y equipos que controlan.

Fuente: Adaptado de Mohamed & El-Gamal (2010)

2.1.7 Azufre no modificado

Come se ha mencionado en este documento, el azufre elemental o no modificado es un elemento que presenta diferentes ordenamientos moleculares o estructuras alotrópicas que dependen de diferentes factores, entre ellos la temperatura de calentamiento, la velocidad de calentamiento y enfriamiento, el tiempo de calentamiento y la cantidad de impurezas que tenga el material. La formación de las diferentes estructuras cristalinas, hace que las propiedades del azufre se alteren, ya que la distancia entre átomos y su orientación variará, al igual que la formación del número de anillos y su empaquetamiento, generando diferentes densidades en un mismo material, por ejemplo, un azufre monoclinico $S\beta$ y un azufre ortorrómbico $S\alpha$ poseen anillos de 8 átomos de azufre, pero su arreglo molecular es diferente, llegando a densidades en el azufre ortorrómbico de 2.069 g/cm³ y de 1.940 g/cm³ para el arreglo monoclinico (Steudel, 2003).

El azufre ha sido utilizado como aglutinante en investigaciones de mezclas para mortero y concreto a base azufre por sus características y propiedades que se generan al endurecer, controlando las formaciones cristalinas. En algunas investigaciones usan modificadores para evitar la transformación de una fase ortorrómbica a monoclinica del azufre y mantener la cantidad y estructura molecular estable; por otra parte, las estructuras cristalinas también se pueden lograr sin modificadores, controlando los procesos de calentamiento y enfriamiento del azufre y las características de los filler, tales como coke, carbón negro, sílice, polvo de sílice, arenas finas y cenizas volantes (Soderberg, 1983; Crick & Whitmore, 1998; Gracia et al., 2004; Mohamed & El-Gamal, 2010; ASTM C287, 2012). Para la presente investigación se utilizó la microsíllica como filler para el mortero MBA, basados en la información recopilada.

2.2 Calamina

Se denomina calamina, cascarilla de laminación o escoria de hierro (capa superficial), al material que se forma de manera instantánea en la producción de elementos de acero por laminación en caliente (p.ej. elementos estructurales de construcción) (Fernández, 2016).

Este proceso es un método donde se precalienta un espécimen de acero a temperaturas cercanas a 1200°C , para luego ser moldeado pasándolo por rodillos laminadores, disminuyendo su espesor y dándole la forma requerida (Smith & Hashemi, 2006).

La calamina tiene la forma de escamas con un espesor cercano a un milímetro, es un material duro, liso y poco flexible, con coloración gris azulada, está conformado por óxido férrico, óxido ferroso, grasas y aceites, los cuales se forman por la oxidación instantánea de la superficie del acero caliente y al enfriarse en contacto con el aire del medio ambiente. El óxido que más se presenta en la calamina es la magnetita (Fe_3O_4), sin embargo, también pueden estar presentes en menor proporción el protóxido de hierro, el sulfuro de zinc, más conocido por wurtzita y óxidos de silicio, calcio y magnesio (Figura 8).



Figura 8. Procedimiento de pesaje de calamina. Fuente: elaboración propia

Al ser la calamina la capa que se produce luego del proceso de laminación en caliente del acero, esta queda adherida al acero al enfriarse, pero al no ser estable se desprende rápidamente quedando como residuos del proceso de fabricación en forma de escamas. En el proceso de desprendimiento, la capa adherida a la superficie protege al acero, sin embargo no es estable ya que se oxida de forma inmediata creando óxido férrico. El óxido férrico tiene un coeficiente de dilatación térmica mucho menor que el del acero, generando una capa frágil que se quiebra permitiendo el ingreso de oxígeno entre los dos materiales. Este proceso produce finalmente una descamación irregular en diferentes partes del elemento de acero. Para remover las capas que no se hayan desprendido de manera natural se deben realizar limpiezas superficiales.

La calamina presenta un pH de 6, un módulo de finura de 5.8, una densidad cercana a 2.0 gramos por litro y su humedad esta entre 0.5 % - 0.6 %, es un material que no se corroe ni se degrada con facilidad (Apraiz, 1997), generando una problemática por su disposición final ya que la escoria se traslada a depósitos al aire libre dentro de las mismas empresas acumulando grandes cantidades de residuos; la escoria se mezcla con el medio circundante, convirtiéndose en vertimientos que afectan el aire, el agua y el suelo (Ordoñez Mejía & Villanueva López, 2012).

Teniendo en cuenta que la producción de acero se realiza casi en su mayoría por medios que utilizan calor para transformar el metal, y esta forma de producción genera gases pesados y escorias metálicas las cuales generan contaminación y perjuicios al medio ambiente, se deben buscar mecanismos que eviten daños en las personas y el medio ambiente, tales como optimización del proceso de fabricación y el uso de contenedores y sitios de disposición de los residuos. En Colombia la producción de residuos peligrosos originario de la industria

básica del hierro y del acero fue del orden de las 16536 toneladas en el 2014, 18680 toneladas en el 2015 y de 25093 toneladas en el 2016, (Santos Calderón et al., 2016; Santos Calderón, Zapata, & Murillo, 2017) (Figura 9).

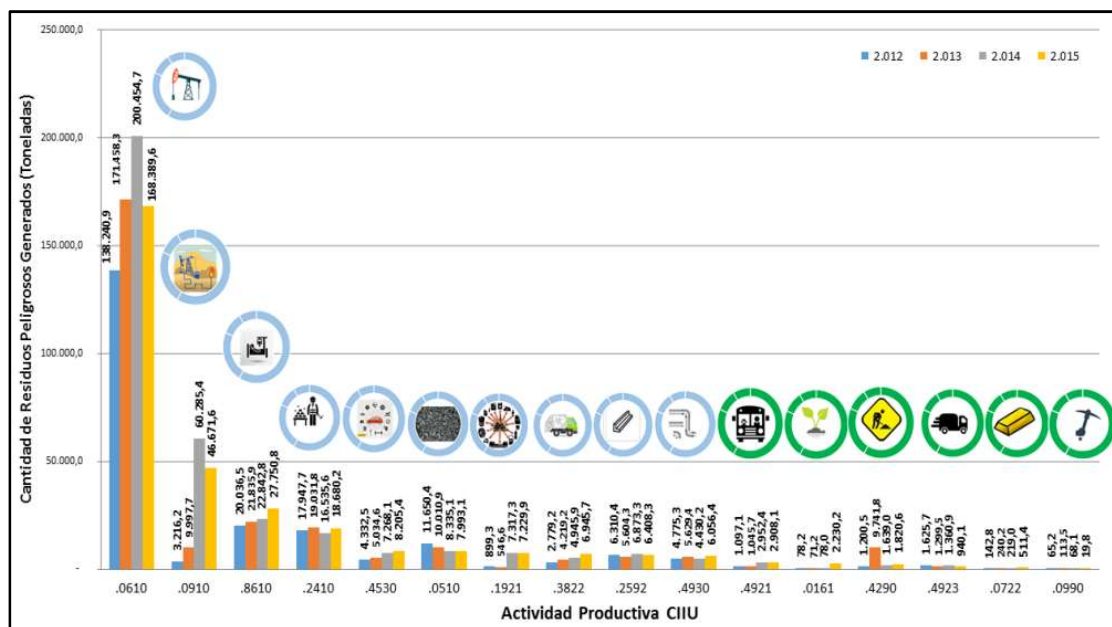


Figura 9. Producción de residuos peligrosos en Colombia. 2012 – 2015. Fuente: Santos Calderón et al.(2016).

Teniendo en cuenta la problemática presentada, se busca utilizar la calamina en la fabricación de MBA para contribuir a la disminución del impacto ambiental que genera la escoria en la producción de acero laminado. La información de caracterización para la calamina se presenta en la Tabla 3 y Tabla 4.

Tabla 3. *Propiedades fisicoquímicas de la calamina*

Parámetro	Unidades	Resultados	Método Analítico
Textura	N/A	Frágil y poco flexible	Visual
Color	N/A	Gris azulado	Visual
Humedad	%	0.63	Gravimétrica
pH	Unidades	6.0	Potenciómetro

Parámetro	Unidades	Resultados	Método Analítico
Grasas y Aceites	mg/L	462.90	Extracción sohlet
Corrosividad	-	No corrosivo	Potenciómetro
Densidad	g/ml	2.12	M/V

Fuente: Adaptado de (Ordoñez Mejía & Villanueva López (2012).

Tabla 4. *Composición química de la calamina*

Parámetro	Unidades	Resultados	Nivel máximo permisible en el lixiviado (mg/L) Dec.4741/05	Límite de vertimientos a cuerpos de agua carga mayor a 3000 kg/día. Res. 0631/15
Hierro total	mg/L	7.75	Sin norma	Análisis y reporte
Arsénico	mg/L	< 0.006	5	Análisis y reporte
Bario	mg/L	< 0.2	100	Análisis y reporte
Cadmio	mg/L	< 0.07	1	0.10
Cromo total	mg/L	< 0.02	5	0.5
Níquel	mg/L	< 0.3	Sin norma	0.50
Plata	mg/L	< 0.06	5	Análisis y reporte
Selenio	mg/L	< 0.005	1	Análisis y reporte
Mercurio	mg/L	< 0.002	0.2	0.02
Plomo	mg/L	< 0.40	5	0.50
Óxido férrico	mg/L	7.8	Sin norma	Análisis y reporte
Óxido ferroso	mg/L	1.4	Sin norma	Análisis y reporte

Fuente: Adaptado de Ordoñez Mejía & Villanueva López (2012) y Resolución número 0631 de 2015, Minambiente (2016).

2.3 Microsílica

El humo de sílice también es conocido como microsílica, humo de sílice condensado, sílice volatilizada o polvo de sílice.

La microsílica es un subproducto del proceso de fundición industrial del silicio y el ferro-silicio. La reducción del cuarzo de alta pureza a silicio, con temperaturas de hasta 2000°C, produce vapores de SiO₂, los cuales se oxidan y condensan como diminutas partículas en la zona de baja temperatura de los hornos, producto el cual se le conoce como sílice no cristalina (Figura 10).



Figura 10. Muestra de microsílica. Fuente: Holland et al. (2006).

De forma general, la microsílica es un polvo color blancuzco a grisáceo, muy similar al cemento portland, tanto en color como en textura, con propiedades puzolánicas y cementantes.

Las propiedades puzolánicas, son aquellas que permiten reaccionar con el hidróxido de calcio para formar compuestos semejantes a los que se producen al hidratar el clínker (Siddique & Khan, 2011).

2.3.1 Propiedades físicas

Las partículas de microsílica son extremadamente pequeñas, con un porcentaje cercano al 100 % de partículas finas ($1\ \mu\text{m}$), Tabla 5.

Tabla 5. *Propiedades de la microsílica.*

Propiedades	Valor
Tamaño de partícula (típico)	$< 1\ \mu\text{m}$

Propiedades	Valor
Densidad aparente	
Según producción	130 – 430 kg/m ³
Lodo	1320 – 1440 kg/m ³
Solidificado	480 – 720 kg/m ³
Gravedad específica	2.22
Área superficial (BET)	13000 – 30000 m ² /kg

Fuente: *Adaptado de* (Holland et al., 2006)

2.3.2 Composición química

La microsilica está compuesta principalmente por sílice pura en forma no cristalina.

Los ensayos realizados por difracción de diferentes microsilicas (Tabla 6) han revelado que el material en esencia es una sílice vítrea, principalmente en forma de cristobalita, con contenido muy altos de dióxido de silíceo amorfo y consiste en partículas esféricas muy finas.

Los materiales que conforman la microsilica están del orden del 95% de SiO₂ y pequeñas cantidades de hierro, magnesio y algunos óxidos alcalinos (Sandvik & Gjorv, 1992; Hooton & Titherington, 2004; Yazıcı, 2008).

Tabla 6. *Composición microsilica diferentes autores*

Óxidos	Sandvik y Gjorv (1992)	Hooton and Titherington (2004)	Yazici (2008)
SiO ₂	92.1	96.65	95.26
Al ₂ O ₃	0.5	0.23	0.89
Fe ₂ O ₃	1.4	0.07	1.97
CaO	0.5	0.31	0.49
MgO	0.3	0.04	0.96
K ₂ O	0.7	0.56	1.31
Na ₂ O	0.3	0.15	0.42
SO ₃	-	0.17	0.33
LOI	2.8	2.27	-

Fuente: Adaptada de Sandvik & Gjorv, Hooton & Titherington, Yazici (1992; 2004; 2008).

Recientes investigaciones han comparado la microsílca producida en 5 plantas de producción de ferroaleaciones y silicio en Rusia (Balabanov & Putsenko, 2017) (Tabla 7), encontrando composiciones de microsílca consistentes a las relacionadas en la Tabla 6.

Tabla 7. Composición microsílca plantas de producción rusas.

Nombre de la empresa	Intención	Clase	Composición química
Elkem Microsilica® Grade 920 ASTM (Norway)	Para soluciones de construcción utilizando concretos.	La clase 920 está disponible en las dos formas: sin sellar (920 U), densidad aparente, que generalmente es de 200-350 kg / m ³ ; y prensado (920 D), densidad aparente - 500-700 kg / m ³	SiO ₂ : 85-90% SO ₃ : 1-2% Cl: 0.1-0.3% CaO:1.0% Si:0.2-.4% Na ₂ O: 1-1.5% C: 1.5-2.0%
Kuznetsk Ferroalloys, Ltd.	Para la obtención de concretos con propiedades especiales: resistencia ultra-alta, mejor desempeño al congelamiento (i), (ii) resistencia a sulfatos y (iii) resistencia a la corrosión y estanqueidad al agua	Sin sellar - MS-85, MS65; Compactado - MSC85, MSC-65; En forma de suspensión - ISS-85	SiO ₂ -90-92% Al ₂ O ₃ : 0,6-0,8% Fe ₂ O ₃ : 0,4-0,7% CaO:0,4-0,9% MgO:0,8-1,0% Na ₂ O:0,6-0,8% K ₂ O:1,2-1,4% C: 0,9-1,2% S: 0,2-0,3%.
Chelyabinsk Electrometallurgical Plant, Ltd.	Aditivo para mejorar rendimiento del concreto.	Sin sellar - MS-85, MS65; Compactado - MSC85, MSC-65; En forma de suspensión - ISS-85	SiO ₂ -90-92% Al ₂ O ₃ : 0,6-0,8% Fe ₂ O ₃ : 0,4-0,7% CaO:0,4-0,9% MgO:0,8-1,0% Na ₂ O:0,6-0,8% K ₂ O: 1,2- 1,4% C: 0,9-1,2% S: 0,2-0,3%.
Serov Ferroalloy Plant, Ltd.	Aditivo para mejorar el rendimiento del concreto.	FS65, FS45	Para 65 Si: 63-68% C: 0.1% S: 0.02% P: 0.05% Al: 2.5% Mg:- 0.4% Cr: 0.4%) Para 45 Si: 41-47% C: 0.2%

Nombre de la empresa	Intención	Clase	Composición química
Bratsk Ferroalloy Plant, Ltd.	Aditivo para concretos, que se utiliza ampliamente en la fabricación de elementos sometidos a abrasión erosiva y que poseen una resistencia mejorada al agua	FS 65, FS 75	S: 0.02% P: 0.05% Al: 2.0% Mg: 1.0% Cr: 0.5%
			Para 65 Si: 63-68% C: 0.1% S: 0.02% P: 0.05% Al: 2.5% Mg: 0.4% Cr: 0.4%
Kremniy (Shelekhov) RUSAL. Ltd	Para las necesidades de las empresas de la industria química y eléctrica	Sin información	Para 75 Si: 74-80% C: 0.1%, S: 0.02%, P: 0.04% Al: 3.0%, Mg: 0.4% Cr: 0.3%
			Na ₂ O: 0.04% MgO: 0.13% Al ₂ O ₃ : 0.14 SiO ₂ : 98.99 P ₂ O ₅ : 0.0060% S: 0.0038% K ₂ O: 0.28% CaO: 0.47%

Fuente: elaboración propia con base en Vlahović et al., Balabanov & Putsenko (2012; 2017)

2.3.3 La microsílca en el concreto

La microsílca es un material de tipo mineral y está compuesto a base de humo de sílice seca y compactada, se utiliza como aditivo para el mortero y concreto hidráulico formulado con características especiales. Debido a su extrema finura y su alto contenido de dióxido de silicio amorfo, es un material altamente reactivo. A medida que el cemento Portland en el concreto comienza a reaccionar químicamente, libera hidróxido de calcio. La microsílca reacciona con el hidróxido de calcio para formar material aglutinante adicional llamado silicato de calcio hidratado, el cual es muy similar al silicato de calcio ya formado a partir de cemento

Portland. La reacción que se produce le da propiedades cementantes al concreto convirtiéndose en un aglutinante adicional que mejora las características al concreto, como se menciona en el ACI Committee 234 (2012) (Figura 11).

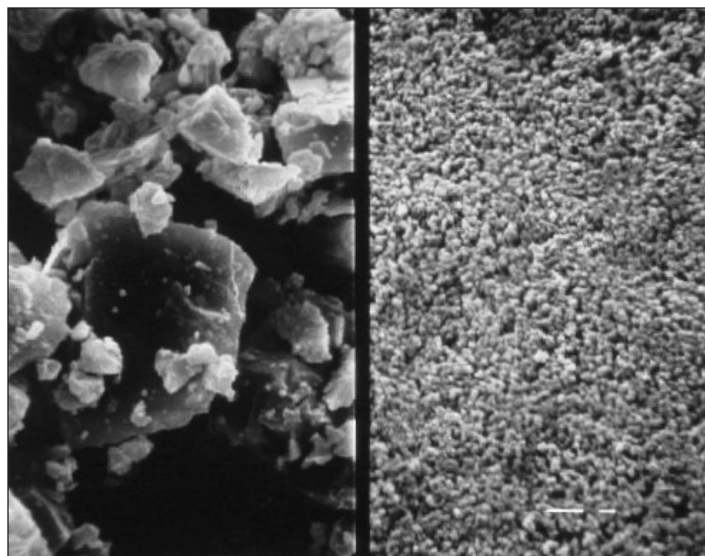


Figura 11. Comparación de granos, granos de cemento (izq.), granos de microsilica (der). (Micrografía por SEM). Fuente: Holland et al. (2006).

Las características física y químicas de la microsilica se describen en la Tabla 8, basadas en la información de la ficha técnica de productos de SikaFume (aditivo en base a microsilice):

Tabla 8. Características de la microsilica

Características	Descripción
Aspecto	Polvo Fino
Densidad	2.01 kg/l aprox.
Contenido de SiO ₂	mayor al 85%
Contenido de SiO ₃	< 2.0%
Contenido de Cl	< 0.3%
Contenido de CaO libre	< 1%
Humedad	Máximo 3%
Retenida malla 325	Máximo 10%

Características	Descripción
Peso específico	2.2 a 2.3 respecto al agua (1g/cm ²)
Pérdida por ignición	< 6%
Superficie específica	> 15 m ² /gr
Índice de actividad puzolánica	> 105

Fuente: Sikafume (2014).

En cuanto a la dosificación de la microsilica, se utiliza en una dosis de 1 al 20% del peso del cemento dependiendo de la cantidad de incremento de resistencia o impermeabilidad deseada (Babu & Prakash, 1995; Khayat & Aitcin, 2004; Rodríguez, Durán, Quintero, & Ballester, 2013). La dosis exacta requerida para las necesidades de durabilidad y resistencia especificada deberá determinarse haciendo ensayos de prueba con los materiales que se usarán para cada proyecto, la cantidad de dosis antes mencionada aplica a casi todas las mezclas de concreto que usan los ingredientes convencionales. Las variaciones de las condiciones de campo, así como de los materiales pueden requerir el uso de dosis diferentes a los rangos recomendados, como el caso del mortero de azufre. En el desarrollo de la mezcla para el MBA, se presentará el análisis para la obtención de cantidades óptimas de microsilica. Las características de alta resistencia química y a la compresión se pueden evidenciar según resultados de ensayos realizados con anterioridad. (McBee & Weber, 1990). La Figura 12 y Figura 13 presentan gráficas del comportamiento de muestras de concreto hidráulico sometidas a ensayos de permeabilidad a cloruros y resistencia a la compresión con diferentes porcentajes de microsilica. A mayor cantidad de microsilica agregada sobre la muestra, hasta un 15%, se obtienen valores más altos de resistencias a la compresión y a su vez disminución en la permeabilidad al ion cloro en las probetas evaluadas.

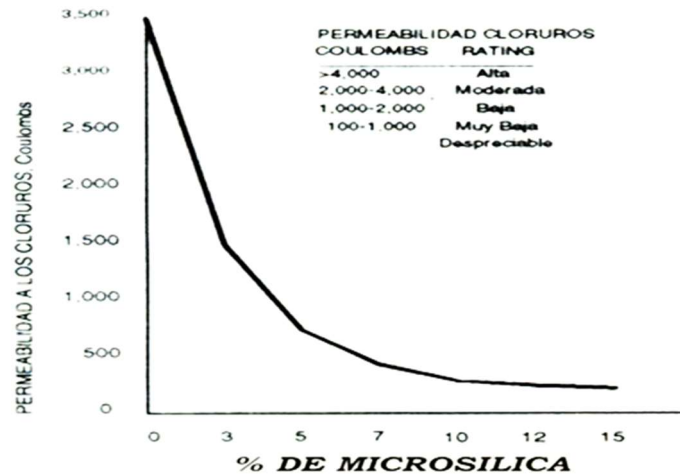


Figura 12. Ensayo rápido de permeabilidad a los cloruros (a.v. Ingeniería, Ficha técnica)

Fuente: Holland et al. (2006).

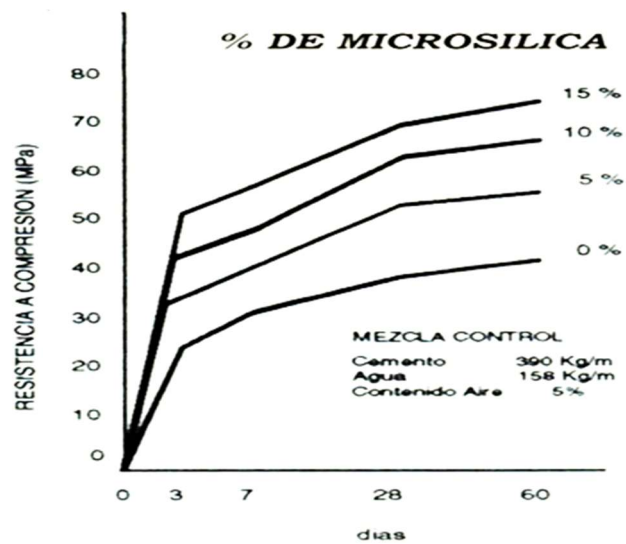


Figura 13. Resistencia a la compresión (a.v. Ingeniería, Ficha técnica). Fuente: Holland et al. (2006)

La reacción de la microsilica en el concreto se desarrolla de tres formas (Cheng-yi & Feldman, 1985).

- La presencia de microsílica en el concreto de cemento Portland causa una reducción representativa del volumen de poros, actuando como relleno debido a su finura y encajando en los intersticios que quedan entre el cemento y los agregados grueso y fino de una mezcla de concreto o mortero.
- La reacción de la microsílica con la cal libre del cemento en el proceso de hidratación (hidróxido de calcio). En la reacción inicial del cemento Portland se forman cristales de hidróxido de calcio en la matriz cementosa, los cuales son una fuente de debilidad debido a que las grietas que se pueden propagar con cierta facilidad a través de los cristales sin mayor resistencia, con la afectación de la durabilidad del concreto, la microsílica reacciona con el hidróxido de calcio libre generando una resistencia adicional a la zona considerada menos resistente, a este proceso se le denomina reacción puzolánica.
- La mejora de la zona de transición entre las partículas de agregado y la pasta de cemento, jugando un papel importante en la unión pasta-agregado. La adición de microsílica influye en el espesor de la fase de transición de los morteros y en la orientación de los cristales de hidróxido de calcio. El resultado de la inclusión de la microsílica es una mejora de las propiedades mecánicas y la durabilidad debido al aumento de la resistencia entre fases.

Es importante mencionar que no solo influye la relación química de C-S-H (reacción puzolánica) en la interfaz, sino también la modificación microestructural del hidróxido de calcio (CH) en la orientación de cristales, la porosidad del concreto final y el aumento de espesor en la zona de transición de pasta-agregado (Gesoglu, Güneyisi, Asaad, & Muhyaddin, 2016).

Dentro de los usos más comunes de la microsílica se tienen las siguientes aplicaciones que se reportan en el estudio de (Hilerio, 2003; Salinas & Escobedo, 2012; Owaid et al., 2012; Rodríguez et al., 2013; Lanez, Oudjit, & Bali, 2015; Massana, Reyes, Bernal, León, & Sánchez-Espinosa, 2018):

- Concretos impermeables.
- Concretos con alta resistencia a la flexo-compresión.
- Concretos con mayor resistencia al desgaste.
- Concretos durables.
- Concretos con resistencia a agentes agresivos.

2.3.4 La microsílica en el MBA

Como se mencionó, la microsílica es un material altamente reactivo en presencia del hidróxido de calcio en la mezcla de morteros o concreto a base de cemento Portland.

Para el caso del MBA, no hay presencia del hidróxido de calcio por lo tanto no se produce el aglutinante adicional de las mezclas cementicias, siendo el azufre el único cementante en la mezcla. La microsílica (silicio y ferro silicio) no reacciona con la calamina (óxido de hierro) y por el contrario llena los intersticios de la mezcla, disminuyendo la porosidad y haciendo impermeable el material, disminuyendo el ataque de ácidos o sales a la calamina o al acero de refuerzo embebido (Khayat & Aitcin, 2004; Lothenbach, Scrivener, & Hooton, 2011). La microsílica en el MBA funciona como un llenante de intersticios, haciendo homogénea e impermeable la mezcla, compacta, y resistente frente a agentes externos.

2.4 Mortero a base de azufre (MBA)

El MBA es un material resultante de la mezcla en caliente de azufre y agregados finos, este se solidifica y gana resistencia rápidamente durante su proceso de enfriamiento. La conformación del MBA incluye agregado fino de diferentes tamaños y su composición es una de las más importantes en la dosificación de la mezcla, donde se debe considerar no solo el tipo de agregado, sino la cantidad de cada uno de los tipos de finos, basándose en conseguir una curva granulométrica que evidencie una gradación con lleno de intersticios (Khademi & Sar, 2015) (Figura 14).



Figura 14. Probeta de MBA Fabricada en Laboratorio Universidad del Norte. Fuente: toma propia

Para la dosificación del MBA, regularmente se conforma en volumen una parte del aglutinante que está alrededor del 30% al 35%, mientras que para los agregados finos se tiene una proporción dividida aproximadamente en un 55% al 60% y como llenante aproximadamente un 10 % de componentes más finos (2 % harina de sílice, 8 % de polvo de agregados pétreos) (Gracia et al., 2004; Lee et al., 2014).

El mortero a base azufre que se desarrolla, busca cumplir con dos aspectos particulares. Inicialmente, que sea un mortero que desarrolle resistencia a la compresión por encima de los 21 MPa en corto tiempo, superando la resistencia que se obtiene con concretos convencionales de la misma resistencia a 28 días (Sánchez de Guzmán, 2001), con esto se está equiparando la resistencia de un mortero con la de un concreto, donde el primero obtendría su resistencia a mayor velocidad con la posibilidad de colocarlo en servicio de manera pronta. Luego, se evalúa su durabilidad, entendiéndola como la capacidad de una estructura o de un elemento estructural de comportarse satisfactoriamente frente a acciones físicas o químicas (ICONTEC 5551, 2007).

A continuación, se exponen los aspectos principales necesarios para el mortero a base de azufre que se busca desarrollar.

Durabilidad: un mortero durable debe mantener su forma original, calidad y características de servicio cuando es expuesto a un ambiente agresivo.

Llenante mineral: se requieren llenantes minerales finos para la mezcla del MBA (Gracia et al., 2004; Lee et al., 2014). Para este propósito se pueden utilizar cenizas volantes, harina de sílice, polvo proveniente de la tritución de rocas de una cantera u otras divisiones finas, insolubles, de material inorgánico que no contenga arcillas u otro material expansivo. El tamaño preferible de partículas está por debajo de las 100 μm . Si el material utilizado presenta un alto contenido de finos, no se necesita un material adicional de relleno. Para los morteros se tiene un porcentaje cercano al 30% de aglomerante donde su tamaño máximo no supera los 2.5 mm para los agregados (Gracia et al., 2004; Khademi & Sar, 2015). La función del relleno es estabilizar el mortero de azufre y reducir la cantidad necesaria de azufre modificado y controlar la transformación cristalina del azufre de ortorrómbico a monoclinico (Adeh, 2008; Jung et al., 2014).

Equipo: dentro de los equipos utilizados para la obtención del mortero, se encuentra el horno, preferiblemente con manejo de temperaturas superiores a 140°C para calentar los agregados y fundir el azufre (Mohamed & El-Gamal, 2010; Vlahović et al., 2012). El precalentamiento del agregado mineral es deseable para evitar la solidificación del azufre fundido por el contacto con la formaleta (choque térmico) y para reducir el tiempo de mezclado, ya que al calentar los materiales y formaletas, tendrían una temperatura mayor a la temperatura ambiente y más cercana a la temperatura de fusión del azufre, lo que hace más eficiente el proceso de mezcla y a su vez, se controla la pérdida de energía por un efecto térmico, lo que afecta la estructura cristalina del MBA. Se utilizan además moldes cúbicos metálicos (aluminio) para el precalentamiento, de dimensiones de 50 mm x 50 mm x 50 mm y varilla para el apisonamiento utilizado para la compactación del mortero (Figura 15).





Figura 15. Horno (izq.), Ollas para fundir azufre (centro) y formaletas (der.) para fabricar probetas de MBA. Fuente: Toma propia.

El MBA es un material termoplástico que se ablanda con el calor a temperaturas mayores a 120°C. Por lo tanto, puede ser demolido, refundido y remodelado sin la pérdida de su resistencia u otras propiedades.

El MBA presenta alta resistencia a la compresión en comparación al concreto de azufre, otro tipo de material que se obtiene a partir de dicho elemento (Tabla 9). La mezcla óptima del MBA se determina seleccionando materiales que cumplen con la descripción definida por las investigaciones de diferentes autores (Gracia et al., 2004; Adeh, 2008; Lee et al., 2014; Mohamed & El-Gamal, 2010), sobre la granulometría necesaria y las cantidades en porcentaje de finos y llenantes en la mezcla de MBA y así poder ejecutar un menor número de ensayos, reducir costos de fabricación y tiempo de elaboración de las diferentes probetas de la mezcla a base de azufre.

Tabla 9. Propiedades mecánicas de mortero, concreto de azufre y concreto hidráulico.

Propiedades	Resultados para mortero de azufre	Resultado para concreto de azufre	Resultado para concreto hidráulico
Esfuerzo a compresión (MPa)	70 – 75	50 – 60	21 – 24
Esfuerzo a flexión (MPa)	12 – 13	8 – 10	10 – 15% f'_c
Esfuerzo a tensión indirecta (MPa)	5 – 6	1.4	10 – 15% f'_c
Contracción (mm/m)	0.6 – 0.7	-	0.5-0.7

Fuente: Adaptado de Gracia et al. (2004)

El MBA y el concreto de azufre en su mayoría se fabrican con el uso de modificadores, los cuales son aditivos que controlan la estructura molecular del azufre en la mezcla.

A partir de las comparaciones en el comportamiento del concreto de azufre, el efecto del modificador provoca un aumento en la formación de cadenas de azufre, es decir produce cadenas más largas de azufre, lo que se conoce como aumento de la polimerización de un elemento (López Carrasquero, 2014), en cambio el mortero dentro de sus propiedades reológicas presenta una mayor viscosidad (Fernández Canovas, 2003), este hecho tiene un efecto importante en la cristalización de azufre. En un material más viscoso y en el que las moléculas son más polimerizadas o molecularmente alineadas, el crecimiento de los cristales al enfriar será más difícil y encontrará más obstáculos, lo que permite que exista más tiempo disponible para el desarrollo de puntos de nucleación o puntos de partida para la formación de cristales. El mayor número de puntos de nucleación conduce a la formación de una estructura con cristales más pequeños, los cuales al crecer, se encuentran con más obstáculos y no son capaces de desarrollar grandes agujeros sobre el azufre elemental. Este comportamiento conduce a una estructura molecular más llena y densa, con un rendimiento superior en un 20% con respecto al azufre elemental y del 68% con respecto concreto

hidráulico, en cuanto a las variaciones mecánicas y térmicas (Tabla 9) (Mohamed & El-Gamal, 2010).

Por todo lo anterior se vuelve tan relevante el estudio de la resistencia mecánica y la durabilidad del mortero de azufre, es importante considerar que en el presente trabajo se determina la resistencia a la compresión de cubos de MBA a la compresión según lo especificado en la Norma NTC 220 (ICONTEC 220, 2012b) y la durabilidad de dichos cubos en presencia de diferentes soluciones relacionadas en la Norma NTC 5551 (ICONTEC 5551, 2007), que describen las características de concretos hidráulicos expuestos a ambientes agresivos, para así determinar las características propias del mortero de azufre ya que hasta la actualidad no es amplia la literatura al respecto y la normativa es bastante reducida. La NTC 220 (ICONTEC 220, 2012a) está encaminada a describir la metodología que se sigue en el laboratorio experimental para asegurar que el mortero de azufre responda a los valores mínimos de resistencia alcanzados a las 24h; la NTC 5551 (ICONTEC 5551, 2007) ayuda a determinar los límites donde los concretos hidráulicos se ven afectados en ambientes agresivos y especifica cuáles son las características que deben tener para poder trabajar en dichas condiciones. Cada una de las normas estará especificada y guiada a lo largo de la descripción metodológica del desarrollo de mortero de azufre.

Los agregados junto con el azufre no modificado se mezclan en caliente, para luego moldearlos en las probetas estipuladas y dejarlas enfriar, con el fin de elaborar especímenes con MBA. El azufre aglutinante pasa por diferentes estados durante el enfriamiento cuando aún en estado líquido, iniciando con formación de cristales, azufre monoclinico ($S\beta$) a una temperatura cercana a los 140°C , seguida de una reducción del volumen del 7%; posteriormente, cuando alcanza una temperatura cercana a los 96°C , la estructura cristalina

del azufre pasa de azufre monoclinico ($S\beta$) a azufre ortorrómbico ($S\alpha$), el cual es la forma estable a temperatura ambiente (Payne & Duecker, 1940; Housecroft & Sharpe, 2012).

Es posible controlar la formación de los cristales del azufre elemental durante el proceso de solidificación, definiendo la distribución del tamaño de grano de los finos en la mezcla, buscar la mayor esfericidad posible en dichos granos, para proporcionar un empaquetamiento denso de los agregados y optimizar la cantidad de aglutinante. Las propiedades individuales de los agregados que participan en la mezcla, aportarán estabilidad resistiendo los agentes químicos y los cambios abruptos de temperatura, lo que redundará en una baja porosidad disminuyendo los espacios o intersticios (Vlahovic et al., 2011).

La Tabla 10 y Tabla 11, presentan valores comunes de ciertas propiedades del concreto y mortero a base azufre, que se referencian en la ASTM C386-12 y se tendrán en cuenta en el análisis de resultados.

Tabla 10. *Propiedades de concreto de azufre.*

Propiedades	Valor
Azufre, % por peso	95.0 ± 1.0
Carbón, % por peso	5.0 ± 0.5
Hidrogeno, % por peso	0.5 ± 0.05
Gravedad específica a 77°F (25°C)	1.9 ± 0.02
Viscosidad, cP at 275°F (135°C)	25 to 100

Fuente: Adaptado de ASTM C386 (2012).

Tabla 11. *Propiedades de concreto de azufre modificado.*

Propiedades	Valor
Azufre, % por peso	80.0 ± 2.0
Carbón, % por peso	18.0 ± 1.0
Hidrogeno, % por peso	2.0 ± 0.1
Gravedad específica a 77°F (25°C)	1.71 ± 0.02
Viscosidad, cP at 275°F (135°C)	35 to 100

Fuente: Adaptado de ASTM C386 (2012)

3 METODOLOGÍA

De acuerdo con el nivel de conocimiento científico, al tipo de información que se analizó y se obtuvo, a la revisión literaria realizada y al nivel de análisis que se desarrolló, se formuló el tipo de estudio y alcance de la presente investigación. Para lograr lo anterior, este trabajo se enfoca hacia una investigación exploratoria, dado que los materiales seleccionados, azufre, calamina y microsílica, no han sido en conjunto lo suficientemente estudiados de acuerdo a la revisión bibliográfica abordada. Igualmente, se considera que es un tema que proyecta nuevas concepciones con una perspectiva innovadora hacia la formulación de un mortero a base azufre sin aditivos modificadores, basados únicamente en la granulometría y el control de temperatura de sus componentes.

La investigación planteada se contempla también como una solución ambiental, al desarrollar un nuevo material que se espera genere una disminución al impacto de la producción de residuos industriales en acerías, refinerías y reducción en la explotación de recursos naturales al no emplear agregados pétreos en la formulación de las mezclas.

Es también una investigación descriptiva, ya que se determinan las características y propiedades del MBA y sus componentes para definir su mejor aplicación en entornos industriales. Por otro lado, de acuerdo al medio o fuente de información utilizado para obtener los datos es una investigación de laboratorio, dado que se realizó en un ambiente controlado, creando un ambiente óptimo que simulara las condiciones de servicio típicos en procesos industriales bajo la presencia de soluciones agresivas, tomando como referencia el concreto a base de cemento Portland con características convencionales tal como se ha manifestado a lo largo de este documento.

De acuerdo al tipo de enfoque, la presente investigación es una investigación cuantitativa, ya que se realiza recolección de datos que permitirán comprobar o no la hipótesis con base en la medición y cálculos numéricos para establecer patrones de comportamiento, se establecieron variables y se sustentaron, a través de procesos deductivos.

A continuación, se enuncian cada una de las fases desarrolladas que dan cumplimiento al objetivo propuesto. Estas fases, en su secuencia y medida, ofrecen información necesaria para constituir las bases e indicaciones ideales para la caracterización de una mezcla de mortero a base de azufre no modificado (MBA) empleando agregados no pétreos, como alternativa en la construcción y recuperación de infraestructuras en ambientes industriales.

Estas fases son:

1. Revisión del estado del arte que sustenta la presente investigación.
2. Selección, caracterización física y justificación de los materiales utilizados para la mezcla de mortero a base azufre no modificado empleando agregados no pétreos como finos y llenantes.
3. Obtención del diseño de la mezcla de componentes para fabricar mortero a base azufre MBA empleando calamina como agregado fino y microsilica como llenante.
4. Determinación de la resistencia a la compresión, las propiedades químicas (durabilidad) y caracterización macroestructural del mortero a base azufre MBA.
5. Análisis y evaluación de los resultados obtenidos en el laboratorio.

3.1 Revisión del estado del arte

Se realizó una revisión del estado del arte de la investigación, se analizaron las tendencias y avances que han ocurrido alrededor del tema; se analizaron las características, composición,

bondades y propiedades de los diferentes materiales que conforman la mezcla de mortero en azufre no modificado y su comportamiento, descrita en la literatura existente. Con dicha información se construyó el marco teórico correspondiente al capítulo II de la presente investigación y que describe los materiales y su impacto en el desarrollo del mortero.

3.2 Selección, caracterización física y justificación de los materiales utilizados para la mezcla de mortero a base azufre no modificado empleando agregados no pétreos como finos y llenantes

Como bien se ha dicho, uno de los objetivos específicos del presente trabajo es desarrollar una mezcla óptima de mortero a base de azufre no modificado. Esto quiere decir que, dentro de las características primordiales e importantes está el conocimiento e investigación adecuada sobre el material principal del diseño de la mezcla, en este caso el azufre. A partir de esta investigación, y según lo estudiado, se encontrará la caracterización de los materiales a utilizar en la mezcla de mortero a base azufre no modificado; se analizará y argumentará la ausencia de modificadores sobre la mezcla de mortero, determinando que a partir de los agregados y características del azufre no modificado se sobrepasan los beneficios y calidad de la mezcla, sin necesidad de acudir o aumentar variables de la misma.

En cuanto a los agregados, por ser una mezcla para mortero de azufre, se incluyen únicamente agregados finos, considerando finos al porcentaje mayor del 50% de granos de un material que pasan por una malla o tamiz No 4, según el Sistema unificado de clasificación de suelos USCS, (Braja, 2016). Los agregados cumplen un papel prioritario, ya que aumentan, mejoran e incluyen propiedades que solo el azufre no puede dar. Por tal caso se utilizan en la mezcla los agregados finos microsílica y calamina. De estos agregados, se tendrán en cuenta sus principales características físicas y mecánicas, explicando su rendimiento y utilización.

Los parámetros considerados encontrados en la Norma ASTM C287 (2012), sirve como guía en la preparación y obtención de resultados para el uso de MBA en ambientes con presencia de sustancias químicas agresivas. Para realizar los ensayos de fabricación de los cubos de MBA y manipulación de azufre, se deben seguir los parámetros de seguridad y usos de elementos de protección personal (EPP) necesarios, descritos en el instructivo para la ejecución de ensayos para determinar la resistencia de cubos de morteros a base azufre, usando calamina y microsíllica que se encuentra en el anexo de este documento.

3.2.1 MBA

La superficie de cada una de las muestras de MBA, después de terminadas, se deben dejar a temperatura ambiente para el auto enfriamiento. Deben además desmoldarse después de 24 horas e inmediatamente ensayarse para evaluar su rendimiento a compresión y durabilidad. Basado en las Normas ASTM C386 (2012) se debe tener en cuenta la práctica que proporciona información detallada sobre el manejo, instalación y uso adecuado de los productos químicos resistentes de los morteros de azufre. En esta norma se presentan consideraciones a tener en cuenta sobre la manipulación del mortero de azufre del presente trabajo. Con lo anterior se pretende cumplir con las siguientes características:

La temperatura ideal para la fusión y manipulación del mortero de azufre fundido es 265 a 290°F (130-145°C). Dentro de este rango el mortero es un líquido que fluye libremente sin problemas con un aspecto brillante. Si el mortero se calienta por encima de 290°F, se espesa y pierde su apariencia de brillo en la superficie. Calentar lentamente hasta que el mortero se haya derretido y alcance las características descritas. En cuanto al manejo de temperaturas, si se produce endurecimiento, aumentar la temperatura gradualmente hasta que desaparezca;

y si se sobrecalienta el mortero, permitir que el material fundido se enfríe mientras se agita con frecuencia (Mohamed & El-Gamal, 2010).

Para el proceso de curado, el mortero de azufre se solidifica rápidamente y aproximadamente a los 30 minutos, se ha alcanzado el 65% de su resistencia a la rotura a una temperatura cercana a 73 °F (23°C).

Con relación a las pruebas de resistencia para el mortero de azufre, se tiene en cuenta la resistencia química a ácidos y sales y la resistencia a compresión.

Los parámetros considerados encontrados en la Norma ASTM C287 (2012), que sirven como guía en la preparación y obtención de resultados, se presentarán a continuación. La composición química del mortero de azufre debe contener: azufre 55-70% y relleno de 45-30%, variando acorde a las alteraciones que se presentan según la cantidad, calidad y tipo de relleno o agregado fino. En cuanto a su resistencia química, se presentan en la Tabla 12, las recomendaciones de la Norma ASTM C287 (2012), para su uso de MBA en ambientes con presencia de sustancias químicas agresivas.

Tabla 12. Guía general para la resistencia química de morteros de azufre.

Substancia	Resistencia química
Ácidos, minerales (no oxidantes)	R
Ácidos, minerales (oxidantes)	R ^c
Ácidos orgánicos	L
Álcalis inorgánica	N
Blanqueadores	N
Gases húmedos, oxidantes	R
Gases húmedos, reducibles	R
Gases no oxidantes y no reducibles	R ^d
Solventes orgánicos	L
<i>R= Recomendación general. L= Límite de uso. N= No recomendado.</i>	

Fuente: Adaptado de ASTM C287 (2012)

En el caso de la resistencia a la compresión, en la literatura no se encuentran suficientes pruebas que demuestren o limiten cantidades comparativas para medir la resistencia; pero se tienen algunos análisis de datos donde menciona que la resistencia a la compresión del mortero es muy dependiente del tiempo de reacción y temperatura (Bahrami Adeg, Mohtadi Haghighi, & Mohammad Hosseini, 2008). Además, se pueden tener en cuenta ecuaciones basadas en pruebas ofrecidas por la ASTM C267 (2012) y NTC 220 (2012a).

Existen diversas maneras de calcular dicha resistencia, variando el parámetro geométrico a tener en cuenta, pero manteniendo la dependencia a la carga máxima soportada. La Ec. 1 y Ec. 2 evidencian lo dicho en la Norma ASTM C267 (2012).

$$S = \frac{4W}{\pi D^2} \quad \text{Ec. 1}$$

donde:

S = resistencia a la compresión, psi (MPa)

W = carga máxima, libras (N)

D = diámetro medido en pulg. (mm).

Ec. 2

$$S = \frac{W}{L_1 L_2}$$

donde:

S = resistencia a la compresión, psi (MPa)

W = carga máxima, libras (N)

L1 y L2 = dimensiones de la sección transversal del cubo mide en pulg. (mm).

A partir de dichas ecuaciones se puede conocer la resistencia a la compresión, y seguido a esto según lo establecido en la ASTM C267 (2012), se puede calcular el cambio en la

resistencia a la compresión. Este cambio se calcula para el 0.01% de la disminución o aumento de la compresión, en el que se calcula la fuerza de las muestras durante la inmersión para cada período de prueba hasta después del acondicionamiento al 100 % de la mezcla. La Ec. 3 muestra la forma de calcular el cambio de resistencia a la compresión.

Ec. 3

$$\% = \frac{S_2 - S_1}{S_1}$$

S1 = resistencia a la compresión promedio de un conjunto de muestras tras el período de acondicionamiento.

S2 = resistencia a la compresión promedio de un conjunto de muestras después del periodo de prueba.

En otro caso, la NTC 220 (2012a) determina la resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico, utilizando cubos de 50 mm o (2”) de lado y compactados en dos capas. Para analizar la resistencia de los cubos que van a ser ensayados a las 24 horas, se sacan de la cámara húmeda cubriéndolos con un paño húmedo, mientras se van pasando a la máquina universal para los ensayos de compresión (Figura 16).



Figura 16. Ensayo a compresión probetas de MBA. Fuente: Toma propia.

Para los otros cubos, se deben sacar del tanque de almacenamiento uno a uno y probarse inmediatamente. Todos los cubos se ensayan dentro de las siguientes tolerancias de tiempo: a las 24 horas $\pm 1/2$ hora; a los 3 días ± 1 hora; a los 7 días ± 3 horas, a los 28 días ± 12 horas y a los 56 días ± 24 horas. Se aplica una proporción de carga aplicada al cubo en el rango de 900 N/segundo a 1800 N/segundo. La Ec. 4 presenta la forma de calcular la resistencia de compresión.

Ec. 4

$$f_m = \frac{P}{A}$$

f_m = resistencia a la compresión, en psi (MPa)

P = carga máxima total en libras (N)

A = área de la superficie cargada en (pulg²)- mm²

La resistencia a la compresión de especímenes aceptables hechos de la misma muestra y ensayados en el mismo periodo deberán ser promediados con una aproximación de 0.007 MPa (1.0 psi).

En el presente documento se considera la utilización de la Ec. 2 para determinar la resistencia a la compresión de las probetas. Se determina una resistencia inicial de las probetas después de 24 horas y una resistencia final luego de ser sometidas a ensayos de durabilidad con soluciones agresivas según norma ASTM C386 (2012).

3.2.2 Azufre

El azufre utilizado en la mezcla es importado de Venezuela y caracterizado en el laboratorio de la Empresa Monómeros Colombo Venezolanos S.A.. Los ensayos realizados de clasificación Granulométrica (ICONTEC1522., 1979)), ensayos de estado (Humedad (ICONTEC 1495., 2013)) y ensayos químicos (Pureza, contenidos y acidez (ICONTEC 1917., 2000)), se realizaron con el fin de determinar las características del azufre a utilizar en los ensayos de mortero a base azufre.

3.2.3 Agregados

Los agregados que conforman el mortero de azufre tienen relevancia por el aporte que generan sobre la mezcla, y a su vez porque el contenido de azufre real en cualquier mezcla dependerá del tamaño máximo de agregado, la forma del mismo, la densidad de mezcla de áridos y el grado de facilidad de trabajo requerido, por lo que se debe considerar el consentimiento y uso adecuado del mismo. En el presente caso se utilizará calamina y microsilica, a continuación se encontrarán las características propias de ambos materiales y valores equivalentes a su dosificación.

Algunas recomendaciones que se hacen sobre los agregados según el STARcrete™ es que, el árido destinado a la exposición continua de ácidos fuertes, tales como sulfúrico, clorhídrico y nítrico, deben tener la resistencia adecuada a los propios ácidos. Por lo que antes de seleccionar un agregado para este fin, se debe comprobar la solubilidad al ácido, este se realiza secándolos y remojándolos durante varias horas en ácido clorhídrico al 15 %, se repite nuevamente el procedimiento hasta probar su resistencia. Para STARcrete™ la resistencia completa a los ácidos fuertes se logra cuando la solubilidad de los agregados en el ácido no

sea superior a 6% y preferiblemente menor que 4% (ASTM C1370, 2012). Ya en el caso del relleno mineral presenta una proporción mucho más pequeña de la mezcla, una solubilidad de ácido de 20 a 25% puede ser tolerada en tal material, sin embargo, ese límite no se puede alcanzar para algunas llenantes como: las cenizas volantes disponibles, harina de sílice o polvo de trituración.

Referente a la gradación, se tiene una designación de tamaños típica para CBA de:

- Agregado grueso 3 to 15 mm
- Agregado fino 0.16 to 3 mm
- Mineral llenante ≤ 0.16 mm

3.2.3.1 *La Calamina*

Para la selección de la calamina se somete a ensayos de resistencia química (ASTM C1370, 2012), para determinar la resistencia química y los efectos de un agregado para morteros en base azufre en condiciones de servicio. Este método de ensayo ayuda a determinar si los agregados son susceptibles al ataque de soluciones en el entorno de uso previsto.

Para el presente caso, se evalúa la resistencia química de la calamina, como agregado de un mortero a base azufre a siete soluciones diferentes y al aire como referencia, que se encuentran de manera típica en la industria de producción de fertilizantes. Estas soluciones son:

1. Ácido fosfórico 0.15% en peso.
2. Cloruro de sodio 0.15% en peso.
3. Ion sulfato saturado.
4. Agua PH < 4.5.
5. Ion amonio > 60 mg/l.

6. Ion sulfato $> 30 \text{ mg/l}$.
7. Ácido clorhídrico saturado.

La calamina utilizada proviene de la Empresa Triple A y las soluciones a las que fue sometida para el ensayo de d fue facilitado por el Laboratorio de la Empresa Monómeros Colombo Venezolanos.

Los equipos utilizados fueron:

- Equipo de pesaje con capacidad de 60.3% de precisión
- Horno con capacidad $110^{\circ} \pm 6^{\circ}\text{C}$
- *Beaker* 600 ml
- Recipientes capaces de mantener la muestra a $60^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$.
- Desecador
- Frasco de vacío
- Embudo
- Papel de filtro cualitativo
- Temperatura ambiente 23°C

Para la realización del ensayo de resistencia química se utilizó el siguiente procedimiento:

Utilizar tres muestras por cada solución, para lo cual se debe secar el agregado hasta tener un peso constante, se procede a enfriar en un desecador antes de pesar y se pesa y anota el valor inicial. Se coloca la muestra en un *beaker* y se adiciona la solución a ensayar, teniendo en cuenta cubrir con vidrio de reloj. Se calienta la muestra y el *beaker* a $60^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}$ y se mantiene durante 24 h, se retira la muestra y se enjuaga con agua destilada para eliminar los remanentes de solución, se seca la muestra completa hasta mantener un peso constante y se pesa la muestra final.

Para el cálculo se utilizó la siguiente ecuación (Ec. 5):

$$\%p\acute{e}rdida = \frac{(W_1 - W_2)}{W_1} 100 \quad \text{Ec. 5}$$

Peso inicial constante en seco de la muestra de ensayo (W_1)

Peso seco constante final de la muestra de ensayo (W_2)

La dosificación de calamina entra a hacer parte de una de las consideraciones en el desarrollo del mortero con base de azufre, puesto que la proporción afecta directamente la resistencia y características tanto físicas como químicas que brindan los agregados al mortero. Algunos desarrollos de pruebas en laboratorio sobre la calamina, sirven como base para establecer los porcentajes que contribuyen de manera óptima sobre las mezcla de MBA. Ordoñez Mejía & Villanueva López (2012) utilizaron cantidades del 0% al 20% para la fabricación de bloques adicionados con calamina. Con la variación del porcentaje adicionado a medida que se elaboran las pruebas preliminares, se pudo determinar que los valores entre el 3% y el 8% en peso, generaban la mayor resistencia en las probetas ensayadas. El análisis evidencia que para los porcentajes superiores al 8%, se producía una reducción de la manejabilidad de la mezcla, afectando la consistencia en el fraguado, por lo que se consideraron valores óptimos de calamina para pruebas de resistencia del orden de 0 a 7% en peso, lo que genera una base para el uso del material. Para analizar el contenido de calamina, se realizaron pruebas de compresión sobre los morteros después de 7 y 14 días de secados.

3.2.3.2 *La microsílica*

Acorde a los resultados obtenidos del tamaño de la calamina, se procedió a la consecución de un llenante, que no fuese de origen sedimentario calizo, para no verse afectados al contacto con diferentes ácidos. Se decidió utilizar microsílica, teniendo en cuenta los beneficios mencionados con anterioridad, su comportamiento inerte (no reacciona con los demás elementos) y que su tamaño corresponde a las necesidades de llenantes propuesto para el MBA. Bajo estos criterios es claro que el uso de microsílica para el presente diseño de mortero a base de azufre, es aceptable con el fin de lograr los requerimientos del mortero a diseñar y conseguir un desarrollo alto en resistencia, permeable a la fuerte exposición de agentes químicos agresivos, y por supuesto un mortero de alta demanda en calidad industrial. Conjuntamente se tiene que dentro de las características, la trabajabilidad de la microsílica es óptima puesto que tiene una alta cohesión y mínima exudación, además representa un incremento de la durabilidad de la mezcla y ofrece alta resistencia inicial y final, alta resistencia a la abrasión, y mayor protección contra la corrosión, acorde a sus propiedades. La microsílica SikaFume usada en la mezcla fue donada por la empresa Sika Colombia con ficha técnica de septiembre-2014.

3.3 Obtención del diseño de la mezcla de componentes para fabricar mortero a base azufre MBA empleando calamina como agregado fino y microsílica como llenante.

Con el fin de obtener una resistencia a la compresión por encima de 21 MPa (resistencia típica de un concreto comercial) a un día luego de la ejecución, se busca la dosificación óptima de cada componente de la mezcla, bajo distintas mezclas preliminares preparadas y

ensayadas con relación a pruebas de ensayo y error, y es así como se obtuvo la proporción de cada tipo de materiales para la mezcla de MBA determinada en porcentaje.

Los ensayos se realizaron temperatura ambiente de 23.0 ± 3.0 °C (73.5 ± 5.5 °F). En el caso de la humedad relativa, esta debe ser en el laboratorio no menor de 50%. En cuanto a la cantidad de especímenes, se tienen tres especímenes de una colada de mortero a base azufre para cada mezcla. Se realizarán tres muestras por molde de tres cubos, para un total de 9 cubos por cada mezcla. Los valores presentados son considerados bajo las Normas nacionales e internacionales asociadas a ensayos de resistencia a la compresión de cubos de mortero (ASTM C1370, 2012; ICONTEC 220, 2012a),.

Se utilizaron moldes cúbicos metálicos (Figura 25) y de polímeros termoestables, con plato de base y desarmables, que cumplan con la Norma ASTM C109 (2016). Para la formaleta utilizada y descrita en el capítulo de metodología, se requiere generar un volumen total de 132.7 cm³ por cubo de muestra y un volumen total de 397.9 cm³ para los 3 cubos de MBA. Adicionalmente a este volumen teórico, y por la experiencia en el manejo del azufre en su estado líquido a aproximadamente 140°C, se presenta una cantidad considerable de desperdicio, principalmente en la olla térmica donde se funden y mezclan los materiales, quedando adherido a las paredes de la olla, y con el uso del cucharón de extracción, con el cual se traslada la mezcla de la olla a los moldes o formaleta de aluminio. El desperdicio se estima en un 30% del peso total del volumen teórico requerido.

La formaleta utilizada para la creación de cubos de muestra tiene una dimensión de 5.1 cm de largo, 5.1 cm de ancho y 5.1 cm de altura y una capacidad para generar 3 cubos.

Una de las propiedades a considerar es el tamaño de los agregados para concreto, que apoyados en el Reglamento colombiano de construcción sismo resistente (AIS, 2010) en su título C, sugiere que los agregados livianos para concreto estructural, en este caso los

utilizados en la mezcla de mortero, cumplan con la NTC 4045 (1997) (Agregados livianos para concreto estructural).

El procedimiento para la elaboración de cubos de mortero de azufre no modificado según la normativa, las circunstancias actuales y las consideraciones sobre el azufre se realiza de la siguiente manera:

1. Se tara la balanza con el recipiente vacío, se toma una muestra de cada material (azufre, calamina y microsílica) debidamente pesado en el recipiente (Figura 17).



Figura 17. Pesaje de las muestras. Fuente: toma propia

2. Se calienta cada material para mantenerlos en la misma temperatura, esto con el fin de no produzca un choque térmico que genere cambios químicos o altere la composición

liquida del azufre al momento de realizar la mezcla. El azufre se calienta en la olla térmica graduada a 120°C por aproximadamente 30 a 40 minutos hasta llegar a la temperatura esperada, logrando llegar al punto de fusión del azufre. Paralelo a este procedimiento, la calamina, la microsílica y la formaleta de aluminio se mantienen a la misma temperatura por calor ofrecido de una estufa eléctrica. (Figura 18).



Figura 18. Fundición y mezclado del azufre y agregados. Fuente: toma propia

3. Llegado al punto de fusión del azufre y estando en estado líquido, se le agrega la microsílica al azufre en la olla térmica, se revuelve constantemente en sentido horario hasta que la microsílica se disuelva completamente en el azufre. La olla debe estar tapada y el proceso debe durar alrededor de 1 minuto. (Figura 19 y Figura 20).



Figura 19. Fusión del azufre. Fuente: toma propia



Figura 20. Olla para fundición de azufre. Fuente propia.

4. Pasado este tiempo se destapa la olla térmica, se toma la calamina con precaución y se le vierte al azufre con microsilica ya mezclado. Con esto, se debe observar un acople rápido, fácil y manejable entre la calamina y el azufre, puesto que no se genera ningún choque térmico. Posteriormente se revuelve la mezcla rápidamente en sentido circular durante 1 a 2 minutos, hasta que quede con una consistencia uniforme y concisa (Figura 21).



Figura 21. Llenado de probetas de MBA. Fuente: toma propia

5. Finalmente se toma aceite Meropa® sintético como desmoldante y se le vierte a la formaleta de aluminio o termoplástica, para posteriormente con el cucharón (a la misma temperatura de la mezcla) tomar la mezcla de la olla térmica y colocarla en los moldes de la formaleta, de tal forma que sea rápida y constante. La idea de la rapidez al ejecutar el procedimiento es porque si se hace a destiempo, la mezcla se rigidiza y pierde contextura uniforme. Al mismo tiempo que la mezcla se vierte en el molde se le debe vibrar para acomodarla uniformemente y disminuir el riesgo de “hormigueros” o vacíos por falta de compactación. Se resalta que las formaletas plásticas tienden a deformarse por lo que se recomienda el uso de formaletas de aluminio herméticas.
6. Al tener los moldes de la formaleta debidamente fundidos y llenos se procede a apagar la estufa eléctrica y dejar reposar la mezcla a temperatura ambiente durante 10 min antes de ingresarlos al laboratorio, en tanto que este posee una temperatura menor y por consiguiente se generaría un gradiente térmico que afectaría la generación de los cristales de la mezcla y así mismo su resistencia (Figura 22).



Figura 22. Probetas finales. Fuente: toma propia

7. Una vez completada la solidificación, se deben quitar los cubos del molde sin que se quiebre la rebaba formada entre la mezcla y el plato. Se deben remover excesos, bordes filosos y añadiduras del cubo, además de verificar la planicidad (Figura 23) de las superficies expuestas como se indica en la Norma NTC 220 (2012b).



Figura 23. Probetas de MBA para ensayo de durabilidad. Fuente: toma propia

8. Después de almacenar los cubos a temperatura ambiente, se toman 24 horas contadas a partir de la terminación del ensayo, hasta el desmolde de los cubos, para determinar el ensayo de resistencia a la compresión de las probetas, siguiendo el procedimiento

descrito en la Norma NTC 220 (2012b); cabe aclarar que una de las principales características del azufre, es su rápida solidificación permitiendo obtener resistencia a las dos horas de haberse realizado la prueba.

Por otro lado, desde el procedimiento de obtención de las muestras hasta el análisis de los cubos, se debe tener en cuenta los parámetros más relevantes relacionados con la durabilidad del concreto y sus limitantes, para eso se tiene en cuenta la Norma 5551 (2007) que se contempla la durabilidad de la estructuras de concreto, donde se dan parámetros que permiten comparar dos elementos diferentes bajo el ataque de un agente externo, y evidenciar los resultados que puede ofrecer el MBA comparado con el concreto hidráulico convencional, utilizando la referencia del concreto f'_c de 21 MPa.

Dentro de los objetivos específicos del presente proyecto se presenta determinar la resistencia del mortero a base azufre al ataque de sustancias que se consideran agresivas, por lo que es de suma importancia considerar esos factores en el proceso de diseño de la mezcla con el fin de lograr utilizar materiales que cumplan con dichas características.

El objetivo de la Norma NTC 5551 (2007) se concentra en establecer parámetros aplicables a concretos hidráulicos sometidos a condiciones de exposición ambiental específicas, a las cuales estará expuesta la estructura durante toda su vida útil. Este objetivo conecta directamente con lo dicho con anterioridad, resaltando que el MBA se realiza con el fin de responder a situaciones comunes en las industrias afectadas por agentes químicos y exposición al desgaste.

El ambiente de exposición del material, es de alto grado de agresividad y este depende entre otras circunstancias, del microclima que la rodea, sea la humedad relativa como la temperatura y el viento, y también los procesos físicos y químicos a los que se exponen por

su servicio. Dentro de estos ataques químicos, se presenta un grado de severidad que varía desde un estado débil, medio hasta alto o severo; y se identifica principalmente sobre la estructura cuando hay presencia de alguno de los siguientes parámetros y valores límites permitidos que influyen en la durabilidad del concreto, como lo expone la Tabla 13.

Tabla 13. *Valores límite de las características químicas del ambiente (agua y suelo) que tienen influencia sobre la durabilidad del concreto sujeto a las distintas subclases de exposición ambiental*

Tipo de medio	Parámetros	Subclase		
		6.1	6.2	6.3
		Ataque débil	Ataque medio	Ataque fuerte
Agua	Valor pH	6.5 – 5.5	3.5 – 4.5	< 4.5
Agua	CO2 diluido (mg/L)	15 - 40	40 - 100	> 100
Agua	Ion amonio NH4 (mg/L)	15 - 30	30 - 60	> 60
Agua	Ion magnesio Mg2 (mg/L)	300 - 1000	1000 - 3000	> 3000
Agua	Ion sulfato SO4 (mg/L)	200 - 600	600 - 3000	> 3000
Agua	Residuo seco (mg/L)	75 - 150	50 - 75	< 50
Suelo	Grado de acidez Baumann- Gully	> 20		
Suelo	Ion sulfato SO2 (mg/kg de suelo seco)	2000 - 3000	3000 - 12000	> 12000
Ejemplos		Instalaciones industriales con sustancias levemente agresivas	Estructuras marinas e instalaciones de conducción y tratamiento de aguas residuales con sustancias de agresividad moderada	Instalaciones de tratamiento de agua con sustancias de agresividad media en instalaciones industriales con sustancias fuertemente agresivas

Fuente: NTC 5551 (2007)

Los requisitos de durabilidad, se fijan teniendo en cuenta las expectativas de durabilidad. Estas expectativas se obtienen con base a la definición de acciones para contrarrestar en forma práctica y eficiente los mecanismos de deterioro que pueden resultar sobre la estructura influenciando en su duración de vida útil. La Norma NTC 4045 (1997) (Agregados livianos para concreto estructural) especifica las características físicas del material, determinado que su gradación se ajuste a las especificaciones de la Tabla 14, y las unidades de masa explicada en la Tabla 15. Para la calamina, se tendría en cuenta estas características ya que dentro de las particularidades de los agregados livianos se encuentran los agregados procesados por escorias de alto horno como es el caso de este material.

Tabla 14. *Designación de tamaño para agregado.*

Designación del tamaño	Porcentaje que pasa					
	25 mm	19 mm	12.5 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm
Agregado fino:						
4.75 mm a 0 mm	-	-	-	100	85 - 100	-
Agregado grueso:						
25 mm a 4.75 mm	95 - 100	-	25 - 60	-	0 - 10	-
19 mm a 4.75 mm	100	90 - 100	-	10 - 50	0 - 15	-
12.5mm a 4.75 mm	-	100	90 - 100	40 - 80	0 - 20	0 - 10
9.5 mm a 2.36 mm	-	-	100	80 - 100	5 - 40	0 - 20
Agregado combinado fino y grueso:						
12.5 mm a 0 mm	-	100	95 - 100	-	50 - 80	-
9.5 mm a 0 mm	-	100	100	90 - 100	65 - 90	36 - 65

Fuente: Adaptado de NTC 4045 (1997)

Tabla 15. *Requisitos para masa unitaria de agregados livianos*

Designación del Tamaño	Masa suelta seca máx (kg/m ³)
Agregado fino	1120
Agregado grueso	880
Agregados finos y combinados	1040

Fuente: Adaptado de NTC 4045 (1997)

3.4 Determinación de la resistencia a la compresión, las propiedades químicas (durabilidad) y caracterización macroestructural del mortero a base azufre MBA.

En esta fase se determina de la resistencia a la compresión a los cubos realizados en el mortero a base azufre (MBA) de acuerdo con la norma NTC 220 (2012b). Los cubos luego de ser realizados son secados a temperatura ambiente del laboratorio, y luego de allí pasan inmediatamente a la máquina universal de ensayos. Una vez preparados los cubos, con sus caras perfectamente planas, se colocan cuidadosamente de manera que la superficie que va a recibir la fuerza sea la misma que estuvo en contacto con las paredes del molde. Estos ensayos de resistencia a la compresión se realizaron en los laboratorios de la Universidad del Norte. Para la capacidad de carga que puede soportar el cubo, como en este caso se espera que reciba una carga máxima mayor a 15 kN, inicialmente se aplica sobre el cubo una carga igual a la mitad del valor esperado, a una velocidad conveniente. La velocidad de aplicación de la carga se calcula de forma que la faltante para romper los cubos con una resistencia esperada mayor a 15 kN y la carga total se aplique sin interrupción en un tiempo comprendiendo entre 20 y 80 segundos.

Después de aplicada la carga sobre los cubos, se realizan los cálculos de acuerdo a la Ec. 6.

$$f_m = \frac{P}{A}$$

Ec. 6

f_m = resistencia a la compresión en MPa.

P= máxima carga total en N (lbf)

A= área de la superficie cargada, mm²

Luego de obtenidos los cubos de mortero a base azufre, basados en el diseño de mezcla óptimo de azufre, calamina y microsilica ejecutados con anterioridad, se procede a seleccionar las soluciones que más se producen en una planta de fertilizantes y más afectación genera al concreto hidráulico convencional, con el fin de poder determinar cuál es el comportamiento del mortero a base azufre expuesto a dichas condiciones severas. Es decir, se definen cuáles son los elementos más agresivos para el concreto hidráulico convencional y se comparan con los elementos que están presentes en el proceso de producción de fertilizantes, de lo cual se determinan los siguientes, para servir como medio de ensayo donde sumergir las probetas de mortero a base azufre:

1. Ácido clorhídrico saturado
2. Ion sulfato saturado
3. Agua básica con PH < 4.5
4. Cloruro de sodio al 0.15%
5. Ion Amonio > 60 mg/L
6. Ácido fosfórico al 0.15%
7. Ion sulfato > 3000 mg/L
8. Aire (comparativo)

Los ensayos para la determinación de las propiedades químicas (durabilidad) se basaron en la NTC 5551 (2007) cuyo método de ensayo está destinado a evaluar la resistencia química

de resina, sílice, silicato, azufre, entre otros materiales, bajo condiciones de servicio previstas.

Estos ensayos para las propiedades químicas se realizaron en el Laboratorio de Monómeros Colombo Venezolanos S.A., bajo temperatura constante de $22 \pm 2^\circ \text{C}$ y una humedad relativa de $68 \pm 4 \%$.

Adicional a la Norma NTC 5551, la presente prueba se basó en la Norma ASTM C267 (2012), “Métodos de prueba estándar para resistencias química de morteros, lechadas, pavimentos monolíticos y hormigones poliméricos”, con el fin de tener en cuenta la frecuencia de cambio en las pruebas, sobre la cual acorde con el inciso 11.2 de ASTM C267 01(2012), se examinaron las probetas con la siguiente frecuencia: 1, 7, 14, 28 y 56 días.

Para las pruebas fue necesaria la caracterización de las 8 probetas de ensayo, cada una destinada a los elementos seleccionados para la prueba de durabilidad del mortero. La caracterización consiste en identificación de la marca del cubo, el peso inicial de la muestra, y las medidas iniciales geométricas exactas por cubo de muestra.

Una vez realizado el ensayo, las probetas se dejan secar sobre una superficie curva por 30 minutos, para que los cubos no reabsorban la solución y garantizar el secado de la probeta; se pesan las muestras y se procede a realizar el ensayo de resistencia a la compresión.

3.5 Análisis y evaluación de los resultados obtenidos en el laboratorio.

Luego de sometidas las muestras (cubos) a los ensayos de compresión y durabilidad, se procede a realizar el análisis de la siguiente manera:

- Se calcula el valor promedio de la resistencia a la compresión después de 24 horas de las muestras de mortero a base azufre (resistencia a la compresión inicial).

- Se determina la variación resultante en las dimensiones de las probetas sometidas al ensayo de durabilidad con soluciones que más se presentan en una planta de fertilizantes y más afectación genera al concreto hidráulico convencional.
- Estos mismos cubos sometidos a ensayos de durabilidad se les determina su resistencia a la compresión (resistencia a la compresión final).
- Finalmente, se analizan estos resultados de resistencia a la compresión y durabilidad obtenidos de la mezcla de mortero a base azufre no modificado que se formuló, a la luz del concreto hidráulico convencional de f'_c 21 MPa.

4 RESULTADOS

4.1 Selección caracterización física y justificación de los materiales utilizados para la mezcla de mortero a base azufre no modificado empleando agregados no pétreos como finos y llenantes.

4.1.1 Azufre

Se determinaron las características del azufre a utilizar en los ensayos de mortero a base de azufre (Tabla 16), a través de clasificación Granulométrica (ICONTEC1522., 1979), ensayos de estado (Humedad (ICONTEC 1495., 2013)) y ensayos químicos (Pureza, contenidos y acidez (ICONTEC 1917, 2000)). Los resultados obtenidos fueron:

Tabla 16. Caracterización del azufre molido - Resultado de los ensayos en el laboratorio de Monómeros Colombo Venezolanos S.A.

Pureza %	99.84
Acidez %	0.008
Cloruro, Cl ppm	14
H ₂ O %	0.11
M. Orgánica %	0.0831
Cenizas %	0.03
Granulometría	
Pasa malla No. 20	100 %

Fuente: Ensayo laboratorio Monómeros Colombo Venezolanos

4.1.2 Agregados

Los agregados utilizados en la mezcla de MBA y caracterizados en la presente investigación son la calamina como agregado fino y la microsílica como llenante.

4.1.2.1 Calamina

En la realización de la investigación, que diera como resultado una mezcla óptima de MBA, se tuvieron en cuenta dos tipos de materiales, el azufre como material cementante y de excelentes propiedades bajo condiciones controladas y la calamina como un material de desecho de procesos industriales en la fabricación del acero en sus diferentes presentaciones. Adicionalmente a lo anterior y basado en las investigaciones realizadas por (Gracia et al., 2004), se determinó que se podían encontrar altas resistencias controlando las granulometrías de los materiales en la mezcla y sin necesidad de modificadores de azufre; en este caso, la calamina y un llenante que aportara partículas de tamaño menor al de la calamina para llenar intersticios y que no reaccionaran con los otros elementos en la mezcla, Tabla 17.

Tabla 17. *Granulometría calamina*

Tamaño (mm)	Tamices	Porcentaje pasa acumulado	Límites porcentaje que pasa. ASTM C33
9.5	3/8	100	100
4.75	No.4	99	95 a 100
2.36	No.8	97	80 a 100
1.18	No.16	94	50 a 85
0.6	No.30	85	25 a 60
0.45	No.40	69	5 a 30
0.3	No.50	57	0 a 10
0.25	No.60	51	0
0.2	No.80	32	-
0.15	No.100	26	-
0.075	No.200	10	-
	Tara	-	-
	Total		

Fuente: Adaptado de ASTM C33/33M (2018)

Para determinar el comportamiento de durabilidad de la calamina frente a diferentes agentes comunes en la Industria se realizó el ensayo de resistencia química del material acorde a la Norma ASTM C1370 (2012), como sigue (Tabla 18):

Resultados ensayo de resistencia química de la calamina a diferentes soluciones producidas en la Industria de Fertilizantes, (ASTM C1370, 2012)

Tabla 18. *Resultado ensayo de resistencia química calamina (ASTM C1370, 2012)*

Solución	Muestra número	Peso inicial W1 (gr)	Peso final W2 (gr)	% de pérdida	Desviación Estándar
Ácido fosfórico 0.15% en peso.	1 de 3	40.04	56.5	40.01	0.00288675
Ácido fosfórico 0.15% en peso.	2 de 3	40.03	46.48	40.02	
Ácido fosfórico 0.15% en peso.	3 de 3	40.05	48.57	40.01	
Cloruro de sodio 0.15% en peso.	1 de 3	40.18	39.65	1.32	0.07824282
Cloruro de sodio 0.15% en peso.	2 de 3	40.12	39.6	1.30	
Cloruro de sodio 0.15% en peso.	3 de 3	40.05	39.58	1.17	
Ion sulfato saturado.	1 de 3	40.1	39.49	1.52	0.44598947
Ion sulfato saturado.	2 de 3	40.24	39.74	1.24	
Ion sulfato saturado.	3 de 3	40.12	39.86	0.65	
Agua PH < 4.5.	1 de 3	40.02	39.57	1.12	0.37128186
Agua PH < 4.5.	2 de 3	40.17	39.51	1.64	
Agua PH < 4.5.	3 de 3	40.13	39.39	1.84	
Ion amonio > 60 mg/l.	1 de 3	40.06	39.42	1.60	0.1656135
Ion amonio > 60 mg/l.	2 de 3	40.12	39.47	1.62	
Ion amonio > 60 mg/l.	3 de 3	40.07	39.54	1.32	
Ion sulfato > 30 mg/l.	1 de 3	40.6	40.23	0.91	0.24272023
Ion sulfato > 30 mg/l.	2 de 3	40.26	39.95	0.77	
Ion sulfato > 30 mg/l.	3 de 3	40.23	39.73	1.24	
Ácido clorhídrico saturado	1 de 3	40.7	29.98	26.34	4.0835446
Ácido clorhídrico saturado	2 de 3	40.03	32.61	18.54	
Ácido clorhídrico saturado	3 de 3	40.08	30.25	24.53	

Fuente: elaboración propia

Observaciones inusuales (Figura 24 a Figura 29):

1. Para realizar el proceso de calentamiento de las muestras a 60 °C por 24 horas, se disponía de una máquina de vapor por inmersión donde los recipientes no podían ser mayores a 2 1/2" de diámetro, por lo que se hizo necesario disminuir el peso de la muestra y el volumen de solución a emplear.

2. Se realizó una conversión directa del peso de la muestra y de la cantidad de solución de la siguiente forma:
 - Peso inicial muestra calamina 200 gr.
 - Volumen de solución inicial 400 ml.
 - Peso inicial de calamina utilizado 40 gr.
 - Volumen inicial de solución utilizado 80 ml.
3. La calamina en presencia de ácido fosfórico se densifica y se adhiere a las paredes del recipiente de vidrio, siendo necesario utilizar una varilla de vidrio para poder despegar el material, adicionalmente al sacarlo, la calamina se convierte en una pasta difícil de manipular, con un tamaño de grano muy pequeño, teniendo que usar más de 4 papeles filtrantes #4, con el fin de no perder material para luego pesarlo. Esta prueba se realizó en 5 oportunidades hasta tener éxito.
4. La solución de Ion sulfato saturado al hacer contacto con la calamina, cambia su color a una tonalidad ámbar.

Los resultados obtenidos por este método de ensayo sirven como una guía para la selección de agregados para MBA, CBA y otros concretos de polímeros resistentes a productos químicos para una aplicación particular de la norma ASTM C1370 (2012).

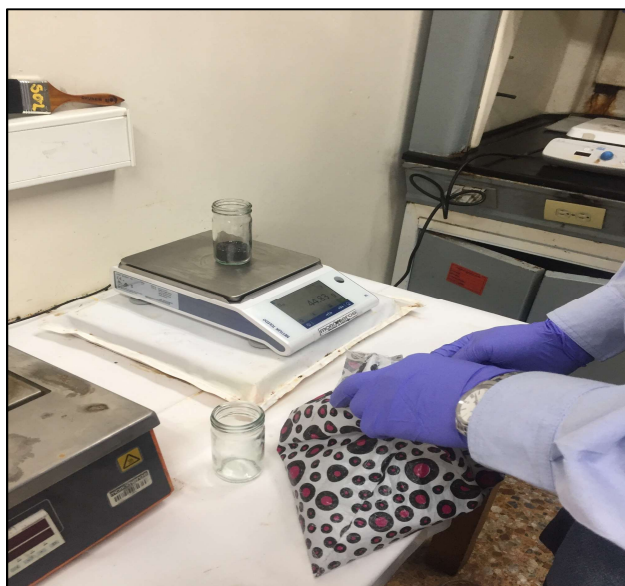


Figura 24. Pesaje inicial de la muestra. Fuente: toma propia

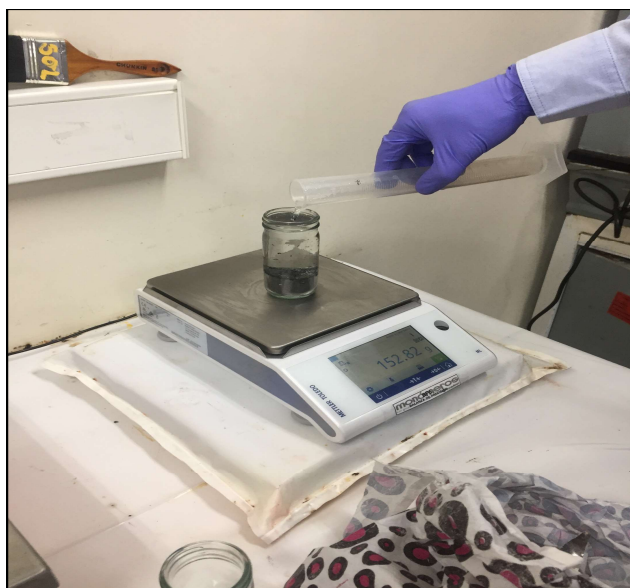


Figura 25. Adición de la solución. Fuente: toma propia



Figura 26. Homogenización de la mezcla. Fuente: toma propia



Figura 27. Sellado y nomenclatura. Fuente: toma propia



Figura 28. Cámara húmeda de la muestra a 60° C. Fuente: toma propia

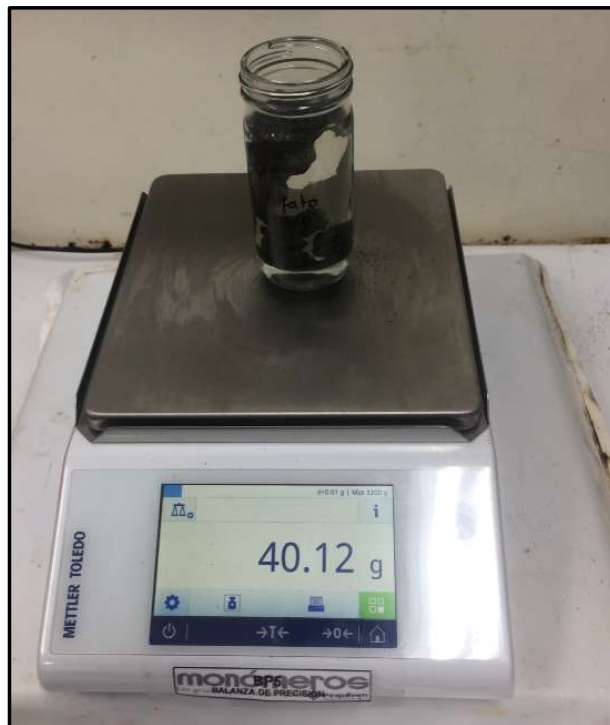


Figura 29. Lavado y pesaje final. Fuente: toma propia

4.2 Obtención del diseño de la mezcla de componentes para fabricar mortero a base azufre MBA empleando calamina como agregado fino y microsílica como llenante.

Para obtener la dosificación óptima de cada componente de la mezcla de mortero a base azufre no modificado se realizó un proceso iterativo a partir de mezclas exitosas desarrolladas de acuerdo a la literatura analizada, obteniendo la cantidad de cada tipo de materiales para la mezcla de MBA determinada en las siguientes proporciones o porcentajes en volumen:

- Azufre – 65% (Densidad: 1.96 g/cm³)
- Calamina – 30% (Densidad: 3.5 g/cm³)
- Microsílica – 5% (Densidad: 0.372 g/cm³)

De acuerdo a la dosificación en porcentaje (%) y la densidad, el volumen por formaleta para cada muestra, los porcentajes y peso de los materiales sobre el MBA y el peso en gramos para un cubo de la mezcla (Figura 30), se determinó de la siguiente manera (según los parámetros indicados en la Tabla 19 y la Tabla 20:

- Azufre – 659.33 g
- Calamina – 543.41 g
- Microsílica – 9.63 g.

Tabla 19. *Volumen por formaleta para las muestras de las mezclas de mortero de azufre*

Descripción	Dimensión (cm ³)
Largo	5.1
Ancho	5.1
Profundidad	5.1
Volumen x 1 cubo	132.7
Volumen x 3 cubos	397.9
Vol. 3 cubos + desperdicio	517.3

Fuente: elaboración propia

Tabla 20. *Porcentaje y peso ajustado de los materiales de la mezcla de mortero de azufre*

Material	Densidad (gr/cm ³)	volumen 1 cubo cm ³	% vol.	% desperdicio	Peso (gr) 3 cubos	2 tandas de 3 cubos (gr)	3 tandas de 3 cubos (gr)
Azufre	1,96	132.7	65	30	659.33	1318.67	1978.00
Calamina	3.5	132.7	30	30	543.41	1086.81	1630.22
Microsílica	0.372	132.7	5	30	9.63	19.25	28.88
Total			100		1212.37	2424.73	3637.10

Fuente: elaboración propia

Para el cálculo del peso de cada material se tiene en cuenta el volumen del cubo multiplicado por la densidad del material respectivo, por su porcentaje en la mezcla e incluyendo el desperdicio del 30%.

Para realizar los pesajes se utiliza una balanza de precisión marca Mettler Toledo, con una carga máxima de 1510 gramos, carga mínima de 0.5 gramos, desviación estándar ≤ 0.01 gramos y un error de 0.01 gramos.

El peso de cada material en un solo cubo se muestra en la Tabla 21.

Tabla 21. *Peso en gramos de los materiales de mortero de azufre para un cubo de muestra (incluye desperdicio)*

Resumen	
% Material	Peso (gr) 1 cubo
65%	219.77
30%	181.07
5%	3.21
100%	403.97

Fuente: elaboración propia



Figura 30. Peso total de la mezcla para 3 cubos de una formaleta. Fuente: toma propia

4.3 Determinación de la resistencia a la compresión, las propiedades químicas (durabilidad) y caracterización macroestructural del mortero a base azufre MBA

4.3.1 Determinación de la resistencia mecánica del mortero de azufre – Resistencia a la compresión.

En la Figura 31 se muestran las fotos del ensayo a compresión realizada a los cubos de MBA.



Figura 31. Determinación de la resistencia mecánica del mortero de azufre – Resistencia a la compresión (ICONTEC 220, 2012b). Fuente: toma propia

Para el ensayo de los cubos, se debe realizar el procedimiento después de 24 horas de almacenamiento, donde una vez secados a temperatura ambiente del laboratorio, pasan

inmediatamente a la máquina de ensayos. Los cubos deben ser revisados en cuanto a la tolerancia según los tiempos especificados en la Tabla 22, ofrecida por la norma NTC 220, (2012a)

Tabla 22. Tolerancia permisible por cada edad de ensayo

Edad del ensayo	Tolerancia permisible
24 horas	$\pm \frac{1}{2}$ hora
3 días	± 1 hora
7 días	± 3 horas
28 días	± 12 horas

Fuente: Norma (ICONTEC 220, 2012b)

Una vez preparados los cubos, con sus caras perfectamente planas, se coloca como se explicó en la metodología, que la superficie que va a recibir la fuerza sea la misma que estuvo en contacto con las paredes del molde.

Como ya se mencionó, para la capacidad de carga que puede soportar el cubo, como en este caso se espera que reciba una carga máxima mayor 15 kN, inicialmente se aplica sobre el cubo una carga igual a la mitad del valor esperado, a una velocidad conveniente. La velocidad de aplicación de la carga se calcula de forma que la faltante para romper los cubos con una resistencia esperada mayor a 15 kN y la carga total en los otros se aplique sin interrupción en un tiempo comprendiendo entre 20 y 80 segundos, para este caso se estimó una velocidad de:

No deben usarse materiales de amortiguamiento o de asiento. Se coloca el bloque de asiento esférico en contacto uniforme con la superficie del espécimen. Se aplica la velocidad de carga con una velocidad relativa de movimiento entre las platinas superior e inferior correspondiente a una carga sobre el espécimen con el rango de 900 a 1800 N/s (200 a 400 lb/s). Se mantiene esta velocidad de movimiento designada de la platina durante la primera mitad de la aplicación de la carga máxima

anticipada y no se hace ningún ajuste en la velocidad de movimiento de la platina en la última mitad de aplicación de la carga especialmente mientras el cubo está fluyendo antes de la falla. (ASTM C39/C39M-18, 2018).

Después de aplicada la carga sobre los cubos, se realizan los cálculos aplicando la del capítulo de metodología, la cual corresponde a la (Ec. 6):

$$f_m = \frac{P}{A} \quad \text{Ec. 6}$$

Donde,

f_m = resistencia a la compresión en MPa.

P= máxima carga total en N (lbf)

A= área de la superficie cargada, mm².

Este método de ensayo provee un medio para la determinación de la resistencia a la compresión del mortero a base azufre como se había nombrado con anterioridad; además, los resultados se pueden usar para comparar con la resistencia de cubos de mortero de cemento hidráulico.

4.3.2 Determinación de las propiedades químicas - Durabilidad

A continuación, se muestra la gráfica de una probeta de MBA siendo ensayada por durabilidad (Figura 32).

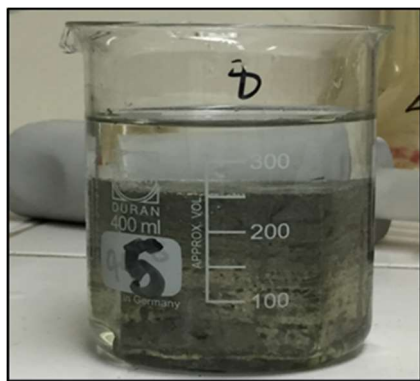


Figura 32. Caracterización química de los cubos de muestra. Fuente: elaboración propia

Las fechas de inspección de probetas fueron:

- Enero 26, día 0 e inicio de ensayo
- Enero 27, día 1
- Febrero 2, día 7
- Febrero 9 día 14
- Febrero 23, día 28
- Marzo 22, día 56 y fin del ensayo

**La Norma permite reducir el tiempo del ensayo (nota 5 de (ASTM C267, 2012)).*

4.3.3 Caracterización macroestructural del mortero a base azufre MBA

Para las pruebas fue necesaria la caracterización de las 8 probetas de ensayo, cada una destinada a los elementos seleccionados para la prueba de durabilidad del mortero. La caracterización consiste en identificación de la muestra de acuerdo a la nomenclatura asignada, las medidas iniciales geométricas exactas por cubo de muestra y por último el peso inicial de la muestra. A continuación, se presenta la información de la caracterización de las muestras (Tabla 23, Figura 33).

Tabla 23. Caracterización de probetas de MBA

Muestra	Identificación de la muestra	Largo (l), mm	Ancho (a), mm	Altura (h), mm	Wo (gr)
Aire	4 rojo	50.8	51.01	51	350.1
HCl concentrado	5 rojo	50.7	51.1	50.78	341.57
Ión sulfato saturado	7 rojo	51.06	51.03	51.14	343.74
Agua pH < 4.5	9 rojo	50.75	51.03	51.09	340.59
Cloruro de sodio 15%	4 negro	51.11	51.09	50.77	350.12
Ion NH ₄ > 60 mg/l	5 negro	51.01	50.88	51.81	369.63
H ₃ PO ₄ 15%	6 negro	51.09	50.84	51.01	356.57
Ion sulfato >300 mg/l	7 negro	50.86	50.11	51.02	350.79

Fuente: elaboración propia

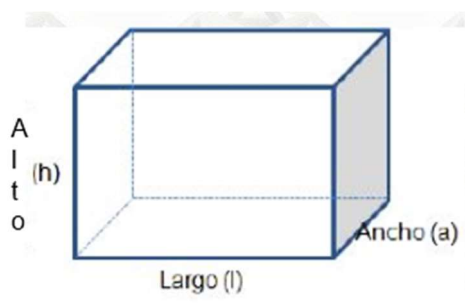


Figura 33. Geometría de probetas de MBA. Fuente: elaboración propia

De manera continua, una vez identificado los días de inspección de probetas se obtiene un reporte según la característica de la muestra con los respectivos ensayos adelantados.

- Día 0:

1. *Aire (comparativo)*: la probeta es de color gris oscuro, con algunos puntos negros, con trazas amarillas en la parte superior, los bordes son regulares y mantienen su verticalidad, se presentan oquedades pequeñas.

2. *Ácido clorhídrico saturado*: la probeta es de color gris pálido, con una leve apariencia amarilla en sus diferentes caras, los bordes son regulares manteniendo su forma, se presentan pequeños orificios de poca profundidad.
3. *Ion sulfato saturado*: la probeta es de color gris oscuro, con trazas amarillas en dos de sus caras adyacentes, los bordes son regulares y su forma constante, se presentan pequeños orificios de poca profundidad.
4. *Agua básica con $pH < 4.5$* : la probeta es de color gris oscuro, con rastros amarillos en una de sus caras y en las aristas, los bordes son regulares y continuos, se presentan pequeños orificios de poca profundidad.
5. *Cloruro de sodio al 0.15%*: la probeta es de color gris oscuro, con rastros amarillos en todas las caras de la probeta, los bordes son regulares, se presentan oquedades pequeñas poco profundas.
6. *Ion Amonio $> 60 \text{ mg/L}$* : la probeta es de color gris oscuro, con trazas amarillas en dos de sus caras, los bordes son regulares y continuos, se presentan oquedades pequeñas.
7. *Ácido fosfórico al 0.15%*: la probeta es de color gris oscuro, con rastros amarillos aleatorios en todas las caras, los bordes son regulares con algunas deformaciones pequeñas, se presentan orificios pequeños de poca profundidad.
8. *Ion sulfato $> 3000 \text{ mg/L}$* : la probeta es de color gris oscuro, con trazas amarillas aleatorias, los bordes son regulares, se presentan orificios pequeños.

Una característica particular de todas las probetas fabricadas, es una textura con porosidad, la cual sólo se aprecia a nivel de la superficie, dichos poros son de poca profundidad y no generan continuidad hacia el interior de la matriz.

Las muestras se introducen en las diferentes soluciones preparadas por los laboratoristas de Monómeros Colombo Venezolanos S.A. Estas soluciones se vierten dentro de diferentes

beakers, a diferencia del de ácido clorhídrico, para el cual se utiliza un recipiente plástico, dado a su reacción con el vidrio y sus propiedades humificantes, lo cual puede ser perjudicial para la salud, tomando la precaución de taparlo (Figura 34).

- Día 1:

1. *Aire (comparativo)*: permanece igual, no hay cambios apreciables en la probeta.
2. *Ácido clorhídrico saturado*: se oscurece el medio de ensayo a un color amarillo pálido.
3. *Ion sulfato saturado*: la solución permanece clara y aparecen en la superficie pequeñas partículas de color pardo, no hay cambios apreciables en la probeta.
4. *Agua básica con $pH < 4.5$* : la solución permanece cristalina y no hay cambios apreciables en la probeta.
5. *Cloruro de sodio al 0.15%*: la solución permanece cristalina y aparecen unas pequeñas burbujas sobre la superficie de la probeta, no hay cambios apreciables en la probeta.
6. *Ion Amonio $> 60 \text{ mg/L}$* : la solución permanece cristalina, no hay cambios apreciables en la probeta.
7. *Ácido fosfórico al 0.15%*: la solución toma un leve color rosado, no hay cambios apreciables en la probeta.
8. *Ion sulfato $> 3000 \text{ mg/L}$* : la solución permanece clara y aparecen en la superficie pequeñas partículas de color pardo, no hay cambios apreciables en la probeta.

Se procede a realizar tres enjuagues de cada probeta con agua y el posterior secado con toallas de papel, se pesan, se reemplaza la solución por nueva solución y se sumergen nuevamente las probetas.

- Día 7:

1. *Aire (comparativo)*: permanece igual, no hay cambios apreciables en la probeta.
2. *Ácido clorhídrico saturado*: la solución toma un color rojizo, algo turbio, La probeta toma un color amarillo y sus lados tienen una textura suave.
3. *Ion sulfato saturado*: la solución permanece clara, no hay cambios de coloración ni en la probeta ni en la solución, la probeta se aprecia con una textura superficial suave.
4. *Agua básica con $pH < 4.5$* : la solución permanece clara, no hay cambios de coloración ni en la probeta ni en la solución.
5. *Cloruro de sodio al 0.15%*: la solución permanece clara, no hay cambios en la probeta ni en la solución.
6. *Ion Amonio $> 60 \text{ mg/L}$* : la solución se aprecia un poco más oscura, sin embargo sigue siendo clara, la probeta se ve con un color gris moderadamente claro.
7. *Ácido fosfórico al 0.15%*: la solución se ve más oscura, con un leve color rosado, la probeta se aprecia superficialmente con una tonalidad rosada pálida y con un rastro de sedimento en el fondo del recipiente, la textura del cubo es ligeramente suave.
8. *Ion sulfato $> 3000 \text{ mg/L}$* : la solución permanece clara, no hay cambios de coloración ni en la probeta ni en la solución, la probeta se aprecia con una textura superficial suave.

Se procede a realizar tres enjuagues de cada probeta con agua y el posterior secado con toallas de papel, se pesan, se reemplaza la solución por nueva solución y se sumergen nuevamente las probetas.

- Día 14:
 1. *Aire (comparativo)*: permanece igual, no hay cambios apreciables en la probeta.
 2. *Ácido clorhídrico saturado*: la solución toma un color rojizo a marrón, turbio, La probeta toma un color amarillo brillante y sus lados tienen una textura suave.
 3. *Ion sulfato saturado*: la solución permanece clara, no hay cambios de coloración ni en la probeta ni en la solución, la probeta se aprecia con una textura superficial suave.
 4. *Agua básica con $pH < 4.5$* : la solución permanece clara, no hay cambios de coloración ni en la probeta ni en la solución.
 5. *Cloruro de sodio al 0.15%*: la solución permanece clara, no hay cambios en la probeta ni en la solución.
 6. *Ion Amonio $> 60 \text{ mg/L}$* : la solución se aprecia más oscura, sin embargo sigue siendo translúcida, la probeta se ve con un color gris ligeramente claro.
 7. *Ácido fosfórico al 0.15%*: la solución se ve más oscura, pero translúcida, con un leve color rosado, la probeta se aprecia superficialmente con una tonalidad rosada pálida, gris y amarillo y con un rastro de sedimento en el fondo del recipiente, la textura del cubo es ligeramente suave.
 8. *Ion sulfato $> 3000 \text{ mg/L}$* : la solución permanece clara, no hay cambios de coloración ni en la probeta ni en la solución, la probeta se aprecia con una textura superficial suave.
 9. Se procede a realizar tres enjuagues de cada probeta con agua y el posterior secado con toallas de papel, se pesan, se reemplaza la solución por nueva solución y se sumergen nuevamente las probetas.

- Día 28:

1. *Aire (comparativo)*: permanece igual, no hay cambios apreciables en la probeta.
2. *Ácido clorhídrico saturado*: la solución toma un color rojizo a marrón, turbio, con rastros de sedimentos flotando en la superficie, La probeta toma un color amarillo brillante y sus lados tienen una textura suave, luego de los tres lavados con agua.
3. *Ion sulfato saturado*: la solución permanece clara, no hay cambios de coloración ni en la probeta ni en la solución, la probeta se aprecia con una textura superficial suave.
4. *Agua básica con $pH < 4.5$* : la solución permanece clara, no hay cambios de coloración ni en la probeta ni en la solución.
5. *Cloruro de sodio al 0.15%*: la solución permanece clara, no hay cambios en la probeta ni en la solución.
6. *Ion Amonio $> 60 \text{ mg/L}$* : la solución se aprecia más oscura, sin embargo sigue siendo translúcida, la probeta se ve con un color gris ligeramente claro, con trazas amarillas.
7. *Ácido fosfórico al 0.15%*: la solución algo turbia, pero se mantiene translúcida, con un color rosado pálido, la probeta se ve superficialmente con una tonalidad rosada, gris y amarillo y con un rastro de sedimento en el fondo del recipiente, la textura del cubo es ligeramente suave, luego de enjuagarla con agua.
8. *Ion sulfato $> 3000 \text{ mg/L}$* : la solución permanece clara, no hay cambios de coloración ni en la probeta ni en la solución, la probeta se aprecia con una textura superficial suave.

Se procede a realizar tres enjuagues de cada probeta con agua y el posterior secado con toallas de papel, se pesan, se reemplaza la solución por nueva solución y se sumergen nuevamente las probetas.

- Día 56:
 1. *Aire (comparativo)*: permanece igual, no hay cambios apreciables en la probeta.
 2. *Ácido clorhídrico saturado*: la solución se aprecia con un color rojizo turbio, con rastros de sedimentos flotando en la superficie, la probeta toma un color amarillo brillante y sus lados tienen una textura suave.
 3. *Ion sulfato saturado*: la solución permanece clara, no hay cambios de coloración ni en la probeta ni en la solución, la probeta se aprecia con una textura superficial suave.
 4. *Agua básica con $pH < 4.5$* : la solución permanece clara, no hay cambios de coloración ni en la probeta ni en la solución.
 5. *Cloruro de sodio al 0.15%*: la solución permanece clara, no hay cambios en la probeta ni en la solución.
 6. *Ion Amonio $> 60 \text{ mg/L}$* : La solución a pesar de verse un poco más oscura, sigue siendo traslúcida, la probeta se ve con un color gris claro, con trazas amarillas.
 7. *Ácido fosfórico al 0.15%*: la solución es algo turbia, con un color rosado pálido, la probeta mantiene superficialmente una tonalidad rosada con trazas grises y amarillas y con un rastro de sedimento en el fondo del recipiente, la textura del cubo es ligeramente suave, luego de enjuagarla con agua. Los sedimentos son granulados, tipo arena de cuarzo.
 8. *Ion sulfato $> 3000 \text{ mg/L}$* : la solución permanece clara, no hay cambios de coloración ni en la probeta ni en la solución, la probeta se aprecia con una textura superficial suave.

Se procede a realizar tres enjuagues de cada probeta con agua y el posterior secado con toallas de papel, se pesan, se reemplaza la solución por nueva solución y se sumergen nuevamente las probetas.

**Nota: Los pequeños orificios encontrados en la inspección inicial en las probetas, se suavizaron y no aumentaron su profundidad.*



Figura 34. Registro fotográfico del procedimiento de ensayo de MBA por durabilidad.
Fuente: toma propia

4.4 Análisis y evaluación de los resultados obtenidos en el laboratorio

4.4.1 Resistencia a la compresión

A continuación la tabulación de los datos obtenidos de cada muestra, teniendo en cuenta las consideraciones sobre informe que determina la norma NTC 220, (2012a).

El valor promedio de la resistencia a la compresión de 90 probetas de mortero a base azufre ensayadas, después de 24 horas fue de 30.78 MPa (Tabla 24).

Tabla 24. Ensayo de Resistencia a la Compresión MBA

No Mezcla	No Prueba	Fecha de falla	Resistencia a 24h (MPa)	Promedio de mezcla (MPa)
1	1	19/11/2015	29.85	29.89
	2	19/11/2015	29.34	
	3	19/11/2015	30.48	
2	4	19/11/2015	28.51	29.23
	5	19/11/2015	29.83	
	6	19/11/2015	29.35	
3	7	20/11/2015	30.45	29.65
	8	20/11/2015	29.57	
	9	20/11/2015	28.93	
4	10	20/11/2015	28.56	29.30
	11	20/11/2015	28.98	
	12	20/11/2015	30.35	
5	13	20/11/2015	28.57	30.11
	14	20/11/2015	31.47	
	15	20/11/2015	30.28	
6	16	01/12/2015	28.94	28.55
	17	01/12/2015	27.88	
	18	01/12/2015	28.82	
7	19	03/12/2015	28.70	28.11
	20	03/12/2015	28.29	
	21	03/12/2015	27.33	

No Mezcla	No Prueba	Fecha de falla	Resistencia a 24h (MPa)	Promedio de mezcla (MPa)
8	22	04/12/2015	32.41	32.06
	23	04/12/2015	29.43	
	24	04/12/2015	34.35	
9	25	04/12/2015	32.89	30.28
	26	04/12/2015	27.65	
	27	04/12/2015	30.29	
10	28	07/12/2015	30.93	28.56
	29	07/12/2015	27.03	
	30	07/12/2015	27.72	
11	31	07/12/2015	32.71	34.35
	32	07/12/2015	33.73	
	33	07/12/2015	36.60	
12	34	07/12/2015	29.10	31.29
	35	07/12/2015	31.48	
	36	07/12/2015	33.28	
13	37	10/12/2015	29.35	30.40
	38	10/12/2015	31.46	
	39	10/12/2015	30.40	
14	40	10/12/2015	28.57	30.76
	41	10/12/2015	34.43	
	42	10/12/2015	29.28	
15	43	10/12/2015	30.47	29.94
	44	10/12/2015	29.87	
	45	10/12/2015	29.48	
16	46	10/12/2015	31.05	30.90
	47	10/12/2015	30.10	
	48	10/12/2015	31.56	
17	49	10/12/2015	29.85	30.30
	50	10/12/2015	28.78	
	51	10/12/2015	32.28	
18	52	10/12/2015	31.95	31.33
	53	10/12/2015	29.47	
	54	10/12/2015	32.58	
19	55	11/12/2015	31.27	30.44
	56	11/12/2015	28.56	
	57	11/12/2015	31.48	
20	58	11/12/2015	32.07	32.58

No Mezcla	No Prueba	Fecha de falla	Resistencia a 24h (MPa)	Promedio de mezcla (MPa)
	59	11/12/2015	31.10	
	60	11/12/2015	34.58	
	61	11/12/2015	34.10	
21	62	11/12/2015	34.86	33.64
	63	11/12/2015	31.96	
	64	11/12/2015	31.15	
22	65	11/12/2015	31.47	31.63
	66	11/12/2015	32.28	
	67	11/12/2015	32.45	
23	68	11/12/2015	32.79	32.84
	69	11/12/2015	33.27	
	70	11/12/2015	28.03	
24	71	11/12/2015	31.94	31.14
	72	11/12/2015	33.46	
	73	12/12/2015	31.01	
25	74	12/12/2015	31.45	32.01
	75	12/12/2015	33.56	
	76	12/12/2015	30.10	
26	77	12/12/2015	30.89	30.75
	78	12/12/2015	31.25	
	79	12/12/2015	31.10	
27	80	12/12/2015	30.57	30.05
	81	12/12/2015	28.48	
	82	23/12/2015	30.36	
28	83	23/12/2015	30.06	30.13
	84	23/12/2015	29.98	
	85	23/12/2015	29.76	
29	86	23/12/2015	32.26	30.86
	87	23/12/2015	30.57	
	88	23/12/2015	30.56	
30	89	23/12/2015	32.41	32.21
	90	23/12/2015	33.67	

Fuente: elaboración propia

4.4.2 Durabilidad

Las probetas de MBA son ensayadas sumergidas en soluciones agresivas y se analiza su comportamiento verificando su peso durante el proceso de aplicación de la norma ASTM C267 (2012) (Tabla 25).

En la ejecución de las probetas para el ensayo de durabilidad, la calamina provino de una fuente diferente a la utilizada para las probetas de los ensayos de resistencia a la compresión, mientras que las fuentes de azufre y microsilica se mantuvieron constante.

Tabla 25. Cambio de peso de los cubos durante el ensayo de durabilidad.

Ensayo de durabilidad a muestras de MBA										
Ítem	Tipo de solución	ID. del cubo	Muestra	día 0	día 1	día 7	día 14	día 28	día 56	Pérdida o ganancia en gramos
				29/01/2016	30/01/2016	6/02/2016	20/02/2016	5/03/2016	2/04/2016	
				W0 (gr)	W 1 (gr)	W 7 (gr)	W 14 (gr)	W 28 (gr)	W 56 (gr)	
1	Aire	4 rojo	Aire	350.51	350.51	350.52	350.52	350.52	350.52	0.01
2	Ácido clorhídrico saturado	5 rojo	HCL Concentrado	341.57	341.49	341	339.87	339.64	339.22	-2.35
3	Ácido sulfúrico saturado	7 rojo	Ion Sulfato Saturado	343.74	343.75	344.01	344.21	344.62	344.96	1.22
4	Agua con PH< 4.5	9 rojo	Agua pH<4,5	340.59	340.6	340.81	340.9	341.01	341.21	0.62
5	Cloruro de sodio al 15%	4 negro	Cloruro de Sodio 0,15%	350.12	350,12	350.12	350.12	350.12	350.12	0.00
6	Ion amonio > 60 mg/Lt	5 negro	Ion NH4 > 60mg/L	369.63	369.62	369.74	369.86	370.11	370.21	0.58
7	ácido fosfórico al 15%	6 negro	H3PO4 15%	356.57	356.56	356.38	356.07	355.91	355.9	-0.67
8	Ión sulfato > 3000 mg/Lt	7 negro	Ion Sulfato > 3000 mg/L	350.79	350.81	351.16	351.42	351.6	351.98	1.19

Fuente: elaboración propia

Los cambios dimensionales de las probetas desde el inicio hasta la culminación del ensayo de durabilidad se muestran en la Tabla 26.

Tabla 26. Los cambios dimensionales de las probetas posteriores al ensayo de durabilidad.

Muestra	Inicial (l), mm	Final (l), mm	Inicial (a), mm	Final (a), mm	Inicial (h), mm	Final (h), mm
Aire	50.8	50.77	51.01	51	51	51.01
HCl concentrado	50.7	50.4	51.1	50.64	50.78	50.71
Ión sulfato saturado	51.06	51.07	51.03	51.04	51.14	51.1
Agua pH < 4.5	50.75	50.76	51.03	51.02	51.09	51.02
Cloruro de sodio 15%	51.11	51.11	51.09	51.11	50.77	51.01
Ion NH ₄ > 60 mg/l	51.01	50.92	50.88	51	51.81	50.95
H ₃ PO ₄ 15%	51.09	50.75	50.84	50.71	51.01	50.88
Ion sulfato >300 mg/l	50.86	50.91	50.11	51.14	51.02	51.09

Fuente: elaboración propia

La variación resultante en las dimensiones de las probetas se presenta resumida en la Tabla 27.

Tabla 27. Variación dimensional de los lados de las probetas, posterior al ensayo de durabilidad.

Muestra	variación (l), mm	variación (a), mm	variación (h), mm
Aire	0.03	0.01	-0.01
HCl concentrado	0.3	0.46	0.07
Ión sulfato saturado	-0.01	-0.01	0.04
Agua pH < 4.5	-0.01	0.01	0.07
Cloruro de sodio 15%	0	-0.02	-0.24
Ion NH ₄ > 60 mg/l	0.09	-0.12	0.86
H ₃ PO ₄ 15%	0.34	0.13	0.13
Ion sulfato >300 mg/l	-0.05	-1.03	-0.07

Fuente: elaboración propia

Posterior al análisis de la caracterización física de los cubos de muestra bajo los ensayos de durabilidad, se procede a determinar la resistencia a la compresión ofrecida por los mismos cubos. Para poder establecer la resistencia a la compresión de las probetas de mortero a base de azufre, fue necesario considerar una resistencia inicial a la compresión, con el fin de compararla con el resto de valores de resistencias obtenidos después de la prueba de durabilidad para cada cubo. La resistencia inicial a la compresión (f'_m) de las probetas de mortero a base de azufre utilizada fue de 30.10 MPa, obtenida a partir de la selección de una de las probetas fabricadas, seleccionando un valor conservador por debajo del valor promedio de la resistencia a la compresión después de 24 horas.

A continuación, se muestran los resultados del ensayo de resistencia a compresión de las probetas de MBA que han pasado por la prueba de durabilidad, de acuerdo a lo explicado en el ítem 3.4 de la metodología (Tabla 28 y Figura 35).

Tabla 28. Resistencia a la compresión promedio de cada cubo ensayado

Ítem	Identificación de la probeta	Solución ensayada	Resistencia promedio MPa	Resistencia final MPa
1	4 rojo	Aire	30.11	31.15
2	5 rojo	ácido clorhídrico saturado	30.11	27.94
3	7 rojo	ácido sulfúrico saturado	30.11	28.18
4	9 rojo	agua con PH< 4.5	30.11	30.28
5	4 negro	Cloruro de Sodio 0.15%	30.11	29.51
6	5 negro	Ión amonio > 60 mg/Lt	30.11	29.12
7	6 negro	ácido fosfórico al 15%	30.11	28.42
8	7 negro	Ión sulfato > 3000 mg/Lt	30.11	28.12

Fuente: elaboración propia

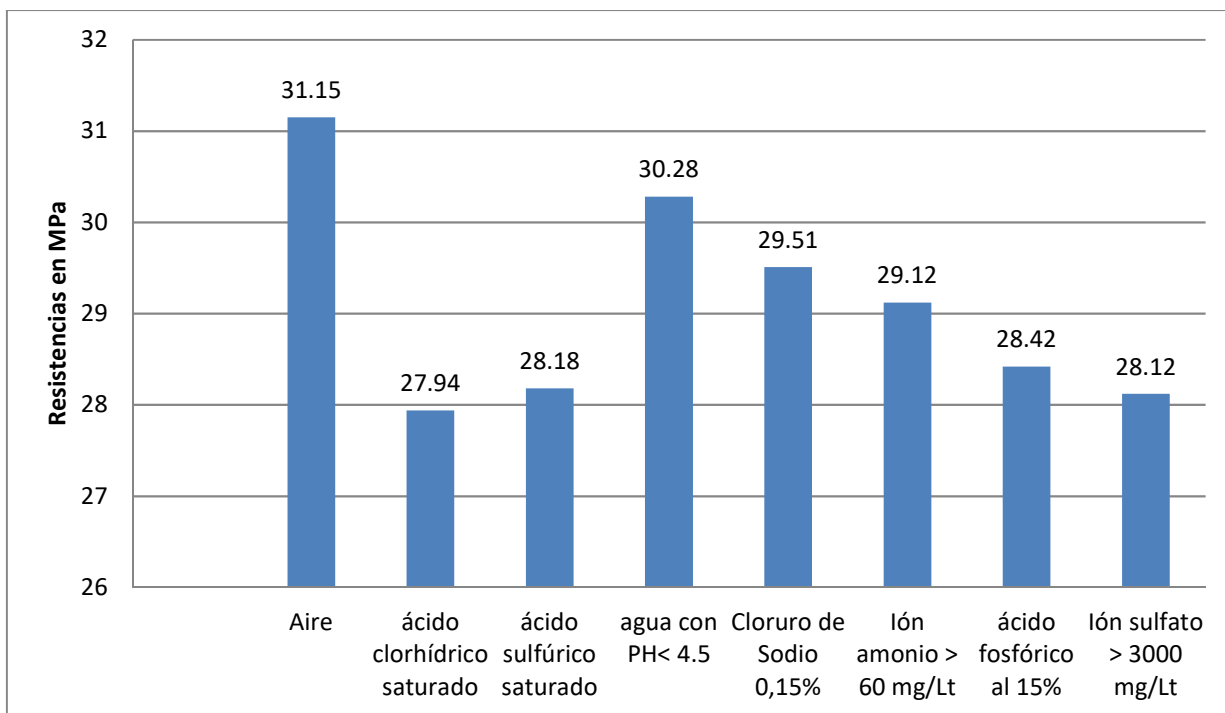


Figura 35. Resistencia final a la compresión de probetas de MBA ensayadas.
Fuente: elaboración propia

El valor promedio de la Resistencia final a la compresión de 16 muestras de mortero a base azufre luego de ser sometidas a ensayos de durabilidad bajo ataque de sustancias agresivas fue de 29.60 MPa.

5 CONCLUSIÓN

- El uso de la calamina y la microsílica en la mezcla de mortero a base azufre bajo condiciones controladas de granulometría y temperatura, genera una alta resistencia a la compresión y mayor durabilidad que un concreto convencional de f'_c 21 MPa (3000 psi), sometido a agentes químicos agresivos, determinados para concretos formulados con cemento portland en la Norma NTC 5551. El valor promedio de la resistencia a la compresión de las muestras de mortero a base azufre obtenida después de 24 horas de fundida fue de 30.78 MPa (4476.26 psi) (, valor superior al de la resistencia a la compresión del concreto convencional, por lo tanto se recomienda su uso en ambientes agresivos industriales como un mortero de alta calidad y menor mantenibilidad
- La mezcla óptima obtenida para el mortero a base azufre sin modificar empleando agregados no pétreos, y para una resistencia a la compresión por encima de 21 MPa (3000 psi, resistencia típica de un concreto comercial), se logró bajo los siguientes porcentajes y proporciones en volumen:
 - Azufre – 65%
 - Calamina – 30%
 - Microsílica – 5%

Al comparar con morteros convencionales de relación 1:1 en volumen (900 kg de cemento 0.72 m³ de agregado fino y 405 litros de agua) , se obtendrían valores entre 21.0 MPa (3000 psi) a los 27.57 MPa (4000 psi), (Rivera A., 2010), lo que estaría por debajo de la resistencia obtenida con el MBA.

- Las muestras de azufre sin modificar empleado agregados no pétreos, sometidas a ensayos de durabilidad bajo ataque de sustancias agresivas a 56 días dieron como resultados valores pequeños que se consideran despreciables en cuanto a la variación de su forma y peso que no afectan la durabilidad del mortero a la fuerte exposición de agentes químicos agresivos. La calamina presentó una desviación estándar máxima de 0.45 gramos, valor poco significativo y que no afectan la resistencia química del material a la fuerte exposición de agentes químicos agresivos. Por el contrario, la muestra de calamina sumergida en ácido clorhídrico reacciona con dicho ácido, disminuyendo significativamente su peso final al 23.13% en 24 horas, sin embargo la calamina al estar mezclada en el mortero a base azufre se ve protegido en la mezcla disminuyendo el ataque del ácido y su degradación, con una pérdida de peso de 0.69% a 56 días.
- El valor promedio de la resistencia final a la compresión de las muestras de mortero a base azufre luego de ser sometidas a ensayos de durabilidad bajo ataque de sustancias agresivas, simulando condiciones de servicio típicos en procesos industriales fue de 29.60 MPa (4293.11 psi), manteniéndose un valor superior al de la resistencia a la compresión del concreto convencional.
- Al tomar muestras de calamina y realizarles ensayos de resistencia química a 24 horas sometiéndolas a siete soluciones diferentes que se encuentran de manera típica en ambientes industriales, arrojaron resultados que en su gran mayoría se mantuvieron estables con una desviación estándar máxima de 0.45 gramos, a excepción de las muestras ensayadas en ácido fosfórico al 0.15% y ácido clorhídrico saturado, con desviaciones estándar de 2.97 gramos para un aumento en peso y 4.08 gramos para una pérdida de peso respectivamente.

- Con la fabricación del mortero a base de azufre caracterizado en este trabajo, se logra el uso de materiales subproductos de procesos industriales con poca reutilización, tales como el azufre y la calamina, lo que contribuye a la conservación y sostenibilidad ambiental.
- Con la obtención del MBA se pueden realizar ensayos con elementos prefabricados tales como tramos de canales en concreto, baldosas sobre pisos de cemento, placas de sacrificio para pisos o muros en concreto, entre otras aplicaciones.
- Se pueden realizar investigaciones tendientes a reemplazar la microsilica por su alto costo en el mercado y determinar la posibilidad del uso de llenantes tales como carbón negro, cenizas de carbón, arenas finas o lodos cenizados, realizando los ensayos correspondientes de durabilidad y granulometría.

6 BIBLIOGRAFÍA

- ACI 548.2R-93/98. (1993). *Guide for Mixing and Placing Sulfur Concrete in Construction*.
- ACI Committee 234. (2012). *234R-06: Guide for the Use of Silica Fume in Concrete (Reapproved 2012)*. American Concrete Institute, 2006.
- ACI Committee 318. (2018). *ACI 318-14. Building Code Requirements for Structural Concrete*.
- Adeh, B. (2008). Preparation of Sulfur Mortar from Modified Sulfur. *Iran. J. Chem. Chem. Eng.*, 27(1), 5.
- AIS. (2010). *AIS, Reglamento colombiano de construcción sismo resistente, NSR-10*. (2a ed., Vols. 1–4). Colombia: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
- Apodaca, L. (2016). Mineral Commodity Summaries 2016, 2.
- Apraiz, B. J. (1997). *Tratamientos térmicos de los aceros*. Ed. Dossat.
- ASTM C33/33M. (2018). *ASTM C33/33M-18. Especificación estándar para hacer hormigón*. USA. Recuperado de <https://www.astm.org/Standards/C33.htm>
- ASTM C39/C39M-18. (2018). *ASTM C39/C39M-18. Método de Ensayo Normalizado para Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto*. Recuperado de <https://www.astm.org/Standards/C39C39M-SP.htm>
- ASTM C109/C109M. (2016). *ASTM C109/C109M-16a. Método de prueba estándar para la resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico*. ASTM. Recuperado de <https://www.astm.org/Standards/C109.htm>
- ASTM C267. (2012). *ASTM C267 Standard Test Methods for Chemical Resistance of Mortars, Grouts, and Monolithic Surfacing and Polymer Concretes*. Recuperado de <https://www.astm.org/Standards/C267.htm>

ASTM C287. (2012). *ASTM C287 Standard Specification for Chemical-Resistant Sulfur Mortar* (Vol. 04.05). West Conshohocken, PA. Recuperado de <https://www.astm.org/Standards/C287.htm>

ASTM C386. (2012). *ASTM C386 -Standard Practice for Use of Chemical-Resistant Sulfur Mortar*.

ASTM C1370. (2012). *ASTM C1370. Método de prueba estándar para determinar la resistencia química de los agregados para el uso en la industria resistente hormigón de cemento y hormigones de azufre, resistentes a productos químicos*. USA. Recuperado de <https://www.astm.org/Standards/C1370.htm>

Babu, K. G., & Prakash, P. V. S. (1995). Efficiency of silica fume in concrete, 25(6), 11.

Bacon, R. ., & Davis, H. . (1921). Recent advances in america sulfur industry. *Chemical and Metallurgical Engieenering*, 24, No 2, 65–72.

Bahrami Adeh, N., Mohtadi Haghighi, M., & Mohammad Hosseini, N. (2008). Preparation of Sulfur Mortar from Modified Sulfur. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE)*, 27(1), 123–127.

Balabanov, V. B., & Putsenko, K. N. (2017). Comparative Analysis of the Principal Characteristics of Microsilica Obtained from Silicon Manufacture Wastes and Used in Concrete Production Technologies. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 262, 12. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/262/1/012011>

Barcia, A. I. G. de D., & Casanova, S. M. (1986). El azufre como material de construcción: Revisión del problema. *Ciencia e Ingeniería*, 18(1), 23–36.

Barros, A. (2018). Informe Opep. Recuperado el 23 de mayo de 2018, de <http://www.panorama.com.ve/politicaeconomia/Informe-Opep-Produccion-en-Venezuela-cayo-hasta1.436-millones-de-barriles-diarios--20180514-0008.html>

- Behfarnia, K., & Salemi, N. (2013). The effects of nano-silica and nano-alumina on frost resistance of normal concrete. *Construction and Building Materials*, 48, 580–584. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.088>
- Braja, M., Das. (2016). *Principles of Foundation Engineering* (8a ed.).
- Broere, W. (2008). *New uses for the world's growing sulphur stockpiles*.
- Cates, M. E. (2007). Theory of the Viscosity of Polymeric Liquid Sulfur. *EPL (Europhysics Letters)*, 4(4), 497. <https://doi.org/10.1209/0295-5075/4/4/019>
- Chakchouk, A., Samet, B., & Mnif, T. (2006). Study on the potential use of Tunisian clays as pozzolanic material. *Applied Clay Science*, 33(2), 79–88. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2006.03.009>
- Cheng-yi, H., & Feldman, R. F. (1985). Hydration reactions in portland cement-silica fume blends. *Cement and Concrete Research*, 15(4), 585–592. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(85\)90056-0](https://doi.org/10.1016/0008-8846(85)90056-0)
- Crick, S. ., & Whitmore, D. W. (1998). Using sulfur concrete on a commercial scale, 20.
- Crow, L. ., & Bates, R. . (1970). Strength of sulfur-basalt concretes. *Bureau of Mines Report No RI 7349*.
- Dale, J. ., & Ludwing, A. . (1965). Mechanical properties of sulfur. *Elemental Sulfur, Chemistry and Physics*, 161–178.
- Dehestani, M., Teimortashlu, E., Molaei, M., Ghomian, M., Firoozi, S., & Aghili, S. (2017). Experimental data on compressive strength and durability of sulfur concrete modified by styrene and bitumen. *Data in Brief*, 13, 137–144. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2017.05.030>
- Duecker, W. . (1934). Admixtures improve properties of sulfur cements. *Chemical and Metallurgical Engineering*, 41 No 11, 583–586.

- Dugarte Coll, M., & Soto Balán, M. (2004). *Diseño de mezcla óptima de concreto a base de azufre modificado utilizando un desarrollo experimental de pruebas y ensayos físicos y químicos*. Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia.
- Fernández, C. S. (2016, febrero 25). La Calamina: el enemigo oculto del acero. Recuperado el 17 de mayo de 2018, de <https://www.patologiasconstruccion.net/2016/02/calamina-acero/>
- Fernández Canovas, M. (2003). Hormigones con fibras: tecnología y propiedades generales. *Hormigon y Acero*, (228/229).
- Fike, H. . (1976). New uses of sulphur an pyrit. *Sulphur Coating, Review and Status Report*.
- Fuhrmann, M., Melamed, D., Kalb, P. D., Adams, J. W., & Milian, L. W. (2002). Sulfur Polymer Solidification/Stabilization of elemental mercury waste. *Waste Management*, 22(3), 327–333. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(01\)00057-5](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(01)00057-5)
- García-Díaz, I., Alguacil, F. J., Gázquez, M., Bolívar, J. P., Coto, I. L., & López, F. A. (2013). Radon exhalation from phosphogypsum stabilized in sulfur polymer cement. *Natural Science*, 05(05), 646–652. <https://doi.org/10.4236/ns.2013.55080>
- Gartner, E. (2004). Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements. *Cement and Concrete Research*, 34(9), 1489–1498. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.01.021>
- Gesoglu, M., Güneyisi, E., Asaad, D. S., & Muhyaddin, F. (2016). Properties of low binder ultra-high performance cementitious composites: Comparison of nanosilica and microsilica. *Construction and Building Materials*, 102, 706–713. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.020>
- Global Peak. (2018, mayo 21). Global Peak. Recuperado el 22 de mayo de 2018, de <http://crudeoilpeak.info/global-peak>
- Gracia, V., Vázquez, E., & Carmona, S. (2004). Utilization of by- produced sulfur for the manufacture of undmodified sulfur concrete, 11.

- Helene, P. R. do L. (1997). *Manual para reparación, refuerzo y protección de las estructuras de concreto*. México: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.
- Hilerio, I. (2003). Abrasión en concreto de alta resistencia Abrasion in high strength concrete, 24(2), 5.
- Holland, T. C., Aïtcin, P.-C., Arney, D. O., Call, B. M., Cohen, M. D., Detwiler, G., ... Wolsiefer, J. T. (2006). *Guide for the Use of Silica Fume in Concrete. Reported by ACI Committee 234R-06*.
- Hooton, R. D., & Titherington, M. P. (2004). Chloride resistance of high-performance concretes subjected to accelerated curing. *Cement and Concrete Research*, 34(9), 1561–1567. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.03.024>
- Housecroft, C., & Sharpe, A. G. (2012). *Inorganic Chemistry* (4 edition). Harlow, England ; New York: Pearson.
- ICONTEC 220. (2012a). *NTC 220. Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico a la compresión, usando cubos de 50 mm ó 2 pulgadas de lado*.
- ICONTEC 220. (2012b). *NTC 220. Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm o 50,8 mm de lado*. (Cuarta). Colombia: ICONTEC.
- ICONTEC 1495. (2013). *NTC 1495. Método de ensayo para determinar en el laboratorio el contenido de agua (humedad) de suelos y rocas, con base en la masa*. Colombia. Recuperado de <https://tienda.icontec.org/wp-content/uploads/pdfs/NTC1495.pdf>
- ICONTEC 1917. (2000). *NTC 1917. Método de ensayo para determinar el corte directo de suelos bajo condiciones consolidadas y drenadas*. Recuperado de <https://tienda.icontec.org/wp-content/uploads/pdfs/NTC1917.pdf>
- ICONTEC 4045. (1997). *NTC 4045. Agregados livianos para concreto estructural*.
- ICONTEC 5551. (2007). *NTC 5551. Durabilidad de estructuras de concreto*.

- ICONTEC1522. (1979). *NTC 1522. Ensayo para determinar la granulometría por tamizado*. Recuperado de <https://tienda.icontec.org/producto/impreso-ntc1522-suelos-ensayo-para-determinar-la-granulometria-por-tamizado/?v=42983b05e2f2>
- Jiménez, L. F., & Moreno, E. I. (2015). Durability Indicators in High Absorption Recycled Aggregate Concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1155/2015/505423>
- Jung, B.-Y., Lee, S.-S., & Song, H.-Y. (2014). Modified Sulfur Distribution and Compressive Strength Characteristics of Modified Sulfur Mortar Based on the Mixing Method and Curing Condition. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 14(1), 61–67. <https://doi.org/10.5345/JKIBC.2014.14.1.061>
- Kalb, P. D., Vagin, S., Beall, P. W., & Levintov, B. L. (2004). Sustainable development in kazakhstan: using oil & gas production by-product sulfur for cost-effective secondary end-use products, 9.
- Khademi, A., & Sar, H. (2015). Comparison of Sulfur Concrete, Cement Concrete and Cement-Sulfur Concrete and their Properties and Application. *Current World Environment*, 10, 201–207. <https://doi.org/10.12944/CWE.10.Special-Issue1.26>
- Khayat, K. H., & Aitcin, P.-C. (2004). Silica Fume - A Unique Supplementary Cementitious Material, 40.
- King, H. M. (2017). Sulfur: Mineral, Native Element, Nutrient. Its uses and properties. Recuperado el 22 de mayo de 2018, de <https://geology.com/minerals/sulfur.shtml>
- Kobbe, W. H. (1924). New Uses for Sulfur in Industry. *Industrial & Engineering Chemistry*, 16(10), 1026–1028. <https://doi.org/10.1021/ie50178a015>

- Lanez, M., Oudjit, M. N., & Bali, A. (2015). Reactivity of Cementitious Additions on Properties of Micro. *World Conference on Technology, Innovation and Entrepreneurship*, 195, 2336–2342. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.06.189>
- Lee, S.-H., Hong, K.-N., Park, J.-K., & Ko, J. (2014). Influence of Aggregate Coated with Modified Sulfur on the Properties of Cement Concrete. *Materials*, 7(6), 4739–4754. <https://doi.org/10.3390/ma7064739>
- Lin, S.-L., Lai, J. S., & Chian, E. S. K. (1995). Modifications of sulfur polymer cement (SPC) stabilization and solidification (S/S) process. *Waste Management*, 15(5–6), 441–447. [https://doi.org/10.1016/0956-053X\(95\)00049-6](https://doi.org/10.1016/0956-053X(95)00049-6)
- Loov, R. E., Vroom, A. H., & Ward, M. A. (1974). Sulfur concrete-a new construction material. *PCI Journal*, 19(1), 86–95. <https://doi.org/10.15554/pcij.01011974.86.95>
- López Carrasquero, F. (2014). *Fundamentos de polímeros*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2573.0000>
- López, F. A., Alguacil, F. J., Rodríguez, O., Sierra, M. J., & Millán, R. (2015). Mercury leaching from hazardous industrial wastes stabilized by sulfur polymer encapsulation. *Waste Management*, 35, 301–306. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.10.009>
- Lothenbach, B., Scrivener, K., & Hooton, R. D. (2011). Supplementary cementitious materials. *Conferences Special: Cement Hydration Kinetics and Modeling, Quebec City, 2009 & Conmod10, Lausanne, 2010*, 41(12), 1244–1256. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.12.001>
- Malhotra, V. M. (1979). *Sulphur concrete and sulphur infiltrated concrete: properties, applications and limitations*. Ottawa: Energie, Mines et Ressources Canada.
- Massana, J., Reyes, E., Bernal, J., León, N., & Sánchez-Espinosa, E. (2018). Influence of nano- and micro-silica additions on the durability of a high-performance self-compacting

concrete. *Construction and Building Materials*, 165, 93–103.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.100>

McBee, W. C., & Sullivan, T. A. (1977). Sulfur Polymer Cement Concrete 4.022.626.

McBee, W. C., & Sullivan, T. A. (1985). Industrial evaluation of sulfur concrete in corrosive environment. *Meening engineering*, 37(1), 37–44.

McBee, W. C., Sullivan, T. A., & Jong, B. W. (1985). INDUSTRIAL EVALUATION OF SULFUR CONCRETE IN CORROSIVE ENVIRONMENTS., 278, 37–44.

McBee, W. C., & Weber, H. . (1990). Sulfur polymer cement concrete. En *Proceeding of the 12th annual Department of energy low level waste management conference*. USA.

McKinney, P. . (1940). *ASTM 96-107*. USA.

Medeiros, M. H. F., Gobbi, A., Réus, G. C., & Helene, P. (2013). Reinforced concrete in marine environment: Effect of wetting and drying cycles, height and positioning in relation to the sea shore. *Construction and Building Materials*, 44, 452–457.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.078>

Meyer, B. (1976). The Structures of Elemental Sulfur. En H. J. Emeléus & A. G. Sharpe (Eds.), *Advances in Inorganic Chemistry and Radiochemistry* (Vol. 18, pp. 287–317). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0065-2792\(08\)60032-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2792(08)60032-1)

Minambiente. Resolución número 0631 de 2015, Minambiente, Pub. L. No. Decreto 1076 de 2015 (2016). Recuperado de <https://diario-oficial.vlex.com.co/vid/resolucion-numero-0631-2015-567960994>

Mohamed, A. (2006). *Reclaiming the Desert*. CRC Press.

Mohamed, A., & El-Gamal, M. (2010). *Sulfur concrete for the construction industry: a sustainable development approach*. J. Ross Pub.

- Moon, J., Kalb, P. D., Milian, L., & Northrup, P. A. (2016). Characterization of a sustainable sulfur polymer concrete using activated fillers. *Cement and Concrete Composites*, 67, 20–29. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.12.002>
- Múnera, J. C., Álvarez-Láinez, M., & Ossa, E. A. (2010). Fabricación y análisis de asfaltos modificados con polímeros, 10.
- Mwangi, P., Brady, P. V., Radonjic, M., & Thyne, G. (2018). The effect of organic acids on wettability of sandstone and carbonate rocks. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 165, 428–435. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.01.033>
- Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete* (5th ed). Harlow, England ; New York: Pearson.
- Ordoñez Mejía, K. J., & Villanueva López, L. (2012). *Elaboración de bloques de mortero tipo estructural mediante secado natural empleando la calamina procedente de Tenaris Tubocaribe S.A. como aditivo*.
- Orlowski, J., Leszczewski, M., & Margal, I. (2004). Stability of polymer sulfur concrete with steel reinforcement, 8.
- Owaid, H. M., Hamid, R. B., & Taha, M. R. (2012). A Review of Sustainable Supplementary Cementitious Materials as an Alternative to All-Portland Cement Mortar and Concrete, 17.
- Payne, C. ., & Duecker, W. . (1940). Construction with Sulphur Cement. *Chemical and Material Engieenering*, 47, 20.
- Primera, E. (2017). *Informe de Gestión Semestral Planta de producción de ácido sulfúrico, Monómeros Colombo Venezolanos S.A.* (Económico). Barranquilla Colombia.
- Regmi, G., Indraratna, B., Nghiem, L. D., Golab, A., & Prasad, B. G. (2011). Treatment of Acidic Groundwater in Acid Sulfate Soil Terrain Using Recycled Concrete: Column

Experiments. *Journal of Environmental Engineering*, 137(6), 433–443.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000331](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000331)

Revista Portafolio. (2018, mayo). Revista Portafolio. Recuperado el 22 de mayo de 2018, de
<http://www.portafolio.co/economia/economicast-marzo-5-de-2018-514890>

Rivera A., G. L. (2010). *Concreto simple* (Universidad del Cauca).

Rizwan, P. N., David, M. F., Sheela, S. J., & Raj, S. D. (2017). Effect of Industrial Waste as Partial Replacement of Ingredients in Ultra High Strength Concrete: A Review, 4.

Rodríguez, S. A., Durán, H., Quintero, C., & Ballesteros, D. (2013). Simulación de la difusión del cl- hasta la despasivación del acero de refuerzo en concreto con microsilíce y expuesto a carbonatación. . . *ISSN*, 10.

Salinas, F. M., & Escobedo, C. J. M. (2012). La durabilidad en las estructuras de concreto reforzado desde la perspectiva de la norma española para estructuras de concreto., 4, 24.

Sánchez de Guzmán, D. (2001). *Tecnología del concreto y del mortero*. Bhandar Editores.

Sandvik, M., & Gjorv, O. E. (1992). Prediction of strength development for silica fume concrete. (Vol. 2). Presentado en Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete. Fourth International Conference American Concrete Institute (ACI).

Santos Calderón, J. M., Murillo, L. G., Torres, O. F., Granados, R. A., Alvarez, A., Arbeláez, P., ... Pardo, L. (2016). *IDEAM, Informe Nacional Generación y Manejo de Residuos o Desechos Peligrosos en Colombia, 2014 y 2015*. Bogotá, D.C., 2016. 96 páginas.

Santos Calderón, J. M., Zapata, A., & Murillo, L. G. (2017). *IDEAM, Informe Nacional de Residuos o Desechos Peligrosos en Colombia, 2016*. Bogotá, D.C., Colombia.

Saraswathy, V., & Karthick, S. P. (2014). Effect of ecofriendly sealing coat against corrosion protection of steel rebars in concrete. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 49(5), 327–334. <https://doi.org/10.1179/1743278213Y.0000000133>

- Shin, M., Kim, K., Gwon, S.-W., & Cha, S. (2014). Durability of sustainable sulfur concrete with fly ash and recycled aggregate against chemical and weathering environments. *Construction and Building Materials*, 69, 167–176. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.061>
- Siddique, R., & Khan, M. I. (2011). *Supplementary Cementing Materials*. Springer Science & Business Media.
- Sikafume. (2014). Silica Fume User's Manual, 194.
- Simoes, A. (2017). Countries that export Azufre. Recuperado el 22 de mayo de 2018, de http://atlas.media.mit.edu/es/visualize/tree_map/hs92/export/show/all/2503/2015/?lang=es
- Smith, W. F., & Hashemi, J. (2006). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. Madrid: MacGraw-Hill.
- Soderberg, A. F. (1983). A new construction material. *Sudic*.
- Steudel, R. (Ed.). (2003). *Elemental Sulfur and Sulfur-Rich Compounds I*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Svensson, M., & Allard, B. (2008). Leaching of mercury-containing cement monoliths aged for one year. *Waste Management*, (28(3)), 597–603.
- Talon, A., Chevalier, J.-L., & Hans, J. (2006). *State of the art report on failure modes effects and criticality analysis research for and application to the building domain*. Grenoble, France: Centre Scientifique et Technique du Batiment.
- UPME. (2016). UPME. Recuperado el 22 de mayo de 2018, de <http://www1.upme.gov.co/Paginas/default.aspx>
- Vlahovic, M. M., Martinovic, S. P., Boljanac, T. D., Jovanic, P. B., & Volkov-Husovic, T. D. (2011). Durability of sulfur concrete in various aggressive environments. *Construction*

and Building Materials, 25(10), 3926–3934.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.024>

Vlahović, M. M., Savić, M. M., Martinović, S. P., Boljanac, T. Đ., & Volkov-Husović, T. D. (2012). Use of image analysis for durability testing of sulfur concrete and Portland cement concrete. *Materials & Design*, 34, 346–354. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.08.026>

Vroom, A. H., & Whitmore, H. . (1991). Sulfur concrete for high corrosion resistance. *Proceeding, National Association of Corrosion Engineers*.

Wright, A. (1859). Composition of matter for ornamental purposes. New Jersey: United States Patent Office.

Xiaoming Wang, Nguyen, M. N., Stewart, M., Syme, M., & Leitch, A. (2010). Analysis of Climate Change Impacts on the Deterioration of Concrete Infrastructure – Synthesis Report. CSIRO Climate Adaptation Flagship, The University of Newcastle. <https://doi.org/10.13140/rg.2.1.4115.6244>

Yazıcı, H. (2008). The effect of silica fume and high-volume Class C fly ash on mechanical properties, chloride penetration and freeze–thaw resistance of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 22(4), 456–462. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.002>

7 ANEXOS

Instructivo para realizar ensayos para determinar la resistencia de cubos de morteros a base azufre, usando calamina y microsilica

1. Objeto

Este instructivo tiene como objeto describir los pasos que se deben realizar para la ejecución del ensayo de fabricación de morteros de azufre, usando agregado fino Calamina y como llenante microsilica.

2. Definiciones.

Azufre: Es un elemento no metálico, insípido, inodoro, de color amarillo pálido, ubicado en el grupo 16 (o VIA) del sistema periódico. Su número atómico es 16 y su masa atómica 32.064 Uma. Es un elemento reactivo que combina con todos los demás elementos excepto gases nobles, oro y platino. Es de origen natural como subproducto de materiales orgánicos descompuestos, y se obtiene a partir de la destilación del petróleo crudo. El azufre tiene diferentes puntos de fusión y endurecimiento, dependiendo de las formas alotrópicas u ordenamientos moleculares que presente en el momento de fundir y de la velocidad de calentamiento. El endurecimiento del azufre por su parte se hace de manera natural al regresar de la temperatura de fusión, siendo este proceso una degradación de los arreglos alótropos que se hayan formado en su estado líquido y de la velocidad de enfriamiento, formando nuevos arreglos moleculares.

La densidad del azufre también varía según su ordenamiento molecular, encontrando densidades máximas en el azufre en estado natural u ortorrómbico de 2.069 g/cm³ hasta densidades mínimas de 1.94 g/cm³ para el azufre fundido o arreglo monoclinico.

El color del azufre varía también acorde al arreglo molecular y a la velocidad y temperatura de calentamiento o de enfriamiento, encontrando coloraciones entre rojo pálido y anaranjado para un arreglo S6, hasta un amarillo limón para un arreglo S18, pasando por amarillo verdoso en arreglos S10, amarillo profundo en arreglos S9, amarillo y amarillo suave en arreglos S8 y S7, amarillo brillante en arreglo ortorrómbico, entre otras coloraciones



Muestra de azufre para ensayos en laboratorio

La viscosidad del azufre en su estado líquido disminuye con el aumento de la temperatura, presentando un rango donde el cambio es considerable, pasando de 7 centipoises a temperaturas cercanas a 160° C hasta 932 poises a 190° C aproximadamente, donde se presenta la máxima viscosidad, a partir de esta temperatura decrece nuevamente, los cambios de viscosidad están relacionados con la formación de cadenas poliméricas y la disminución de anillos estables tipo S8.

Calamina: Se denomina calamina, cascarilla de laminación o escoria de hierro (capa superficial), al material que se forma de manera instantánea en la producción de elementos de acero por laminación en caliente.

La calamina tiene la forma de escamas con un espesor cercano a un milímetro, es un material duro, liso y poco flexible, con coloración gris azulada, está conformado por óxido férrico, óxido ferroso, grasas y aceites, los cuales se forman por la oxidación instantánea de la superficie del acero caliente y al enfriarse en contacto con el aire del medio ambiente. La calamina presenta un pH de 6, un módulo de finura de 5.8, una densidad cercana a 2.0 gramos

por litro y su humedad esta entre 0.5 % - 0.6 %, es un material que no se corroe ni se degrada con facilidad



Muestra de calamina para ensayos en laboratorio

Microsílica: El humo de sílice también es conocido como microsíllica, humo de sílice condensado, sílice volatilizada o polvo de sílice.

La microsíllica es un subproducto del proceso de fundición industrial del silicio y el ferro-silicio. La reducción del cuarzo de alta pureza a silicio, con temperaturas de hasta 2000°C, produce vapores de SiO_2 , los cuales se oxidan y condensan como diminutas partículas en la zona de baja temperatura de los hornos, producto el cual se le conoce como sílice no cristalina.



Muestra de calamina para ensayos en laboratorio

3. Ensayos para microsílica y calamina.

De clasificación:

Granulometría.

Se denomina clasificación granulométrica o granulometría, a la medición y graduación que se lleva a cabo de los granos de una formación sedimentaria, de los materiales sedimentarios, así como de los suelos, con fines de análisis, tanto de su origen como de sus propiedades mecánicas, y el cálculo de la abundancia de los correspondientes a cada uno de los tamaños previstos por una escala granulométrica.

Módulo de finura:

El módulo de finura da una idea del grosor de los granos que conforman el material analizado, ya que este parámetro tiene importante incidencia en el comportamiento de la microsílica al realizar mezclas por su consumo de humedad.

Tipo de estado:

Humedad natural:

Este ensayo tiene por finalidad, determinar el contenido de humedad de una muestra de suelo. El contenido de humedad de una masa de suelo está formado por la suma de sus aguas libre, capilar e higroscópica. La importancia del contenido de agua que presenta un suelo representa junto con la cantidad de aire, una de las características más importantes para explicar el comportamiento de este (especialmente en aquellos de textura más fina), como por ejemplo cambios de volumen, cohesión, estabilidad mecánica, entre otros.

Peso específico:

La densidad relativa (gravedad específica) es la característica usada para el cálculo del volumen ocupado por el agregado en una muestra, que son proporcionadas o analizadas en base a un volumen absoluto.

En general los agregados deben cumplir lo establecido en la norma ASTM C 33

4. Ensayos para el azufre.

Los ensayos de clasificación (Granulometría), ensayos de estado (Humedad) y ensayos químicos (Pureza, contenidos y acidez), con el fin de determinar las características del azufre a utilizar en los ensayos de mortero en base azufre.

En general el azufre debe cumplir lo establecido en la norma ASTM D3515.

5. Equipos y herramientas de trabajo.

- Juego de tamiz (100, 80, 63, 50, 40, 25, 20, 12.5, 10, 6.3, 5, 2, 1.25, 0.40, 0.16 y 0.08 mm).
- Taras, Olletas y recipientes.
- Estufa.
- Horno secador.
- Balanza con precisión del 0.1% de la carga máxima.
- Probetas.
- Embudos plásticos y metálicos.
- Varillas.
- Cuchara y cucharón metálico.
- Bandejas metálicas.
- Moldes de aluminio para cubos de 50 mm.
- Máquina Universal para ensayos a compresión.
- Microsílica.
- Calamina.
- Azufre granulado 99.1% de pureza o mayor.

6. Mortero a base de azufre MBA.

○ Resumen del método de ensayo:

El objetivo de este ensayo es realizar un mortero de azufre con una dosificación clara, común y sencilla, utilizando azufre sin modificadores y agregados finos y llenante, buscando resultados con propiedades mecánicas adecuadas para su uso cotidiano.

○ Dosificación.

Realizar una mezcla con las siguientes proporciones:

- ✓ Azufre – 65% (Densidad: 1.96 g/cm³)
- ✓ Calamina – 30% (Densidad: 3.5 g/cm³)
- ✓ Microsílica – 5% (Densidad: 0.372 g/cm³)

De acuerdo con la dosificación en porcentaje (%) y la densidad, el volumen por formaleta para cada muestra, los porcentajes y peso de los materiales sobre el MBA y el peso en gramos para un cubo de la mezcla, se determinó de la siguiente manera:

- ✓ Azufre – 659.33 g
- ✓ Calamina – 543.41 g
- ✓ Microsílica – 9.63 g.

○ Procedimiento creación de mezcla de azufre.

Inicialmente se dosifica la cantidad de cada tipo de material para la mezcla. Se determina la proporción óptima para obtener una resistencia a la compresión promedio de 30 MPa a 24 horas luego de la ejecución de la muestra,

La formaleta para la formación de los cubos de muestra de la mezcla de azufre debe tener una dimensión de 5.1cm de largo, 5.1cm de ancho y 5.1cm de altura y una capacidad para generar 3 cubos. Con esto se requiere generar un volumen total de 132.7 cm³ por cubo de muestra y un volumen total de 397.9 cm³ para los 3 cubos muestras. Adicionalmente a este volumen teórico y por la experiencia en el manejo del azufre en su estado líquido a aproximadamente 120°C, se presenta una cantidad considerable de desperdicios principalmente en la olla térmica donde se mezclan los materiales, el cucharón de extracción

para trasladar la mezcla de la olla a los moldes o formaleta de aluminio, la cual se estima en un 30% del total del peso del volumen teórico requerido, teniendo así un volumen total de 517.3 cm³.

Volumen por formaleta para las muestras de las mezclas de mortero de azufre

Descripción	Dimensión (cm ³)
Largo	5.1
Ancho	5.1
Profundidad	5.1
Volumen x 1 cubo	132.7
Volumen x 3 cubos	397.9
Vol. 3 cubos + desperdicio	517.3
Dimensiones de cubos de mortero y volúmenes respectivos	

Se preparará el mortero de azufre, iniciando con el calentamiento del azufre hasta una temperatura entre 130 y 145°C (265 y 293° F) determinada por un termómetro de metal insertado cerca del centro de la masa. Este procedimiento se mantendrá por 3 horas hasta que el azufre esté totalmente fundido.

Se debe verificar la temperatura a intervalos de aproximadamente una hora durante el proceso de fundición.

Al mismo tiempo se deben calentar en el horno, los agregados y el molde de manera separada, con el fin de evitar el endurecimiento prematuro por el choque térmico entre los diferentes materiales a ensayar y el recipiente que los contendrá, cómo se especifica en la norma ASTM C 31.

Temperatura de calentamiento del molde: 138°C (281° F)

Temperatura de calentamiento de los agregados: 130°C (265° F)

Una vez fundido el azufre y el molde y los agregados precalentados se mezclan apropiadamente por un lapso no inferior a 3 minutos, hasta obtener una mezcla viscosa.

Una vez realizado el proceso de fundido y mezcla con los agregados precalentados, se procede a iniciar el moldeo de los cubos.

Aplicar un poco de aceite mineral caliente al molde (que haga las veces de desmoldantes) y utilizar un cucharón o cualquier otro dispositivo vertedor para llenar rápidamente cada uno de los tres compartimientos hasta que el material fundido alcance la parte superior del agujero. El material se compactará con una varilla de punta semiesférica o se colocará en una mesa vibratoria por 10 segundos.

Se enrasa la superficie y se dejan endurecer a temperatura ambiente por mínimo 3 horas para proceder a desmoldar.

Una vez completada la solidificación, se deben sacar los cubos del molde sin que se quiebre la rebaba formada entre la mezcla y el plato. Se debe remover excesos, bordes filosos y añadiduras del cubo y verificar la planicidad de las superficies expuestas como se indica en la norma ASMT C 109.

Después de almacenar los cubos a temperatura ambiente, se toman 24 horas para el ensayo de resistencia a la compresión de los cubos de mortero de azufre, siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM C 109.

- Temperatura:

Los ensayos se realizarán a temperatura ambiente, la temperatura del aire en el entorno, los materiales secos, moldes, placas de base y tazón de mezclado, deben ser mantenidos entre 23.0 ± 3.0 °C (73.5 ± 5.5 °F). ASTM C33 – NTC 220.

- Humedad:

La humedad relativa del laboratorio no debe ser menor de 50%. ASTM C33 – NTC 220.

- Cantidad de especímenes: Se hacen tres especímenes de una colada de mortero en base azufre para cada mezcla. Se realizarán tres muestras por molde de tres cubos, para un total de 9 cubos por cada mezcla. Se trata de comparar con las normas ASTM C33 – NTC 220, que referencia ensayos de resistencia según las edades de las probetas.

- Moldes:

Se utilizarán moldes cúbicos metálicos o de polímeros termoestables, con plato de base y desarmables, que cumplan con la norma ASTM C 109.



- Curado.

Las muestras se deben curar a temperatura y humedad ambiente, sin la aplicación de producto alguno.

- Determinación de la resistencia a la compresión. ASTM C 39

Se debe de aplicar la carga a las caras de espécimen que estuvieron en contacto con las superficies verdaderamente planas del molde. Se coloca cuidadosamente el espécimen en la máquina de ensayo de bajo del centro del bloque del apoyo superior. Antes del ensayo de cada cubo, se debe comprobar que el bloque asentado esféricamente esté libre para inclinarse. No deben usarse materiales de amortiguamiento o de asiento. Se coloca el bloque de asiento esférico en contacto uniforme con la superficie del espécimen. Se aplica la velocidad de carga con una velocidad relativa de movimiento entre las platinas superior e inferior correspondiente a una carga sobre el espécimen con el rango de 900 a 1800 N/s (200 a 400 lb/s). Se mantiene esta velocidad de movimiento designada de la platina durante la primera mitad de la aplicación de la carga máxima anticipada y no se hace ningún ajuste en la velocidad de movimiento de la platina en la última mitad de aplicación de la carga especialmente mientras el cubo está fluyendo antes de la falla.

Este método de ensayo provee un medio para la determinación de la resistencia a la compresión del mortero en base azufre y los resultados se pueden usar para comparar con la

resistencia de cilindros de concreto de cemento hidráulico. Se debe tener en cuenta la aplicación de los aspectos similares que aparecen en la Norma ASTM C39, “Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm o 50.8 mm de lado.”

- Tabulación de datos.

- Cálculos. ASTM C39

Se registra la carga total máxima indicada por la máquina de ensayo, y se calcule la resistencia a la compresión como sigue:

$$f_m = \frac{P}{A}$$

Donde,

f_m = resistencia a la compresión en MPa.

P= máxima carga total en N (lbf)

A= área de la superficie cargada, mm².

Los especímenes de 50 mm pueden ser usados para la determinación de la resistencia a la compresión, si se utilizan unidades SI o pulg-libra.

Sin embargo, deben usarse unidades coherentes para la carga y el área para calcular la resistencia en las unidades seleccionadas. Si el área de sección transversal de un espécimen varía en más del 1.5% de la nominal, se usa el área real para el cálculo de la resistencia a la compresión. La resistencia a la compresión de todos los especímenes de ensayo aceptables hechos de la misma muestra y ensayados en el mismo período debe ser promediada y llevada a 0.1 MPa (10 lb/pulg²) más cercanos.

Elementos de protección personal (EPP)

- Gafas de seguridad Industrial.
- Guantes para fundición.

- Mascarilla desechable contra polvos
- Mascarilla contra vapores ácidos

8. Normas básicas de seguridad para trabajos civiles.

Precaución – Se puede producir sulfuro de hidrógeno durante el cabeceo cuando el mortero de azufre se contamina con materiales orgánicos como parafina o aceite. El gas es incoloro y tiene un mal olor notorio de huevos podridos; sin embargo, el olor no debe verse como signo de advertencia, ya que la sensación al olor desaparece rápidamente a la exposición. Altas concentraciones son letales y dosis menores de concentración pueden producir náusea, malestar estomacal, mareo, dolor de cabeza o irritación en los ojos. Por esta y otras razones, el recipiente de fundido se debe colocar debajo de una campana con un ventilador de extracción y el área de cabeceo debe estar bien ventilada.

Se debe mantener una ventilación adecuada durante la ejecución del ensayo y las precauciones normales para el manejo de fluido caliente materiales (protección de ojos, manos, nariz y boca, con uso adecuado de guantes, gafas y tapabocas).

Uso adecuado de elementos de protección personal (EPP).

Revisión previa, verificación y prueba del buen estado de herramientas, equipos y accesorios que deba utilizar durante su labor.

Antes de limpiar, reparar, ajustar, cambiar algún elemento; asegúrese que el equipo este completamente fuera de servicio.

Prohibido el uso de relojes, anillos, pulseras, cadenas u otras prendas sueltas.

Utilice las normas de levantamiento y transporte de carga (posiciones y movimientos), no levantar peso superior a 25 kilogramos.

Si no conoce o tiene dudas en cualquier labor a realizar, consulte con un supervisor o Ingeniero a cargo.

En áreas con riesgo de salpicaduras ubique con anticipación donde quedan las duchas y lava ojos de emergencia.

Mantenga y entregue el área de trabajo en óptimas condiciones de orden y limpieza.

Recuerde ningún trabajo es tan urgente, ni tan importante, que no le permita tomar el tiempo necesario para hacerlo con seguridad.

7. Salud ocupacional.

○ Factores de riesgo.

La tarea origina exposición a los siguientes riesgos:

Mecánicos:

- Golpes (uso de herramientas menores).
- Machucones (Uso de herramientas menores).
- Proyecciones (polvo, suciedad, mortero).
- Caída al mismo nivel (desnivel en el piso o tropezones).

Físico:

- Agotamiento por calor (Se funden materiales en estufas y hornos).

Químico:

- Gases (Inhalación de gases por fundición de azufre).
- Líquidos (contacto con materiales fundidos).

Ergonómico:

- Carga estática (trabajo de pie).
- Posturas inadecuadas (inclinación del tronco).
- Carga dinámica (material pesado).
- Postura inadecuada (híper extensión - ocasional).
- Sobre esfuerzo (halar, empujar, subir, bajar – ocasional).

○ Aptitudes sobresalientes para la labor.

Para la labor amerita tener las siguientes aptitudes:

- Compresión.
- Comprensión espacial.
- Visión
- Motricidad fina.
- Comunicación.

○ Recomendaciones especiales.

“ANTES DE INICIAR LA LABOR, VERIFIQUE QUE SE CUMPLA LO ESTABLECIDO EN EL ANALISIS Y CONTROL DE RIESGOS DEL INSTRUCTIVO DE TRABAJO”.

8. Referencias.

ACI Committee 234. (2012). *234R-06: Guide for the Use of Silica Fume in Concrete (Reapproved 2012)*. American Concrete Institute, 2006.

ASTM C39/C39M-18. (2018). *ASTM C39/C39M-18. Método de Ensayo Normalizado para Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto*. Recuperado de <https://www.astm.org/Standards/C39C39M-SP.htm>

ASTM C267. (2012). *ASTM C267 Standard Test Methods for Chemical Resistance of Mortars, Grouts, and Monolithic Surfacing and Polymer Concretes*. Recuperado de <https://www.astm.org/Standards/C267.htm>

Gracia, V., Vázquez, E., & Carmona, S. (2004). Utilization of by- produced sulfur for the manufacture of unmodified sulfur concrete, 11.

Gwon, S., Jeong, Y., Oh, J. E., & Shin, M. (2017). Sustainable sulfur composites with enhanced strength and lightweightness using waste rubber and fly ash. *Construction and Building Materials*, 135, 650–664. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.024>

ICONTEC 220. (2012). *NTC 220. Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico a la compresión, usando cubos de 50 mm ó 2 pulgadas de lado*.

Mohamed, A. (2010). Sulfure concrete for the construction industry.

Nimer, E. L., & Campbell, R. W. (1985). Sulfure cement- aggregate compositions and method for preparing.

Ordoñez Mejía, K. J., & Villanueva López, L. (2012). *Elaboración de bloques de mortero tipo estructural mediante secado natural empleando la calamina procedente de Tenaris Tubocaribe S.A. como aditivo*.

Vlahović, M. M., Savić, M. M., Martinović, S. P., Boljanac, T. Đ., & Volkov-Husović, T. D. (2012). Use of image analysis for durability testing of sulfur concrete and Portland cement concrete. *Materials & Design*, 34, 346–354. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.08.026>

9. Hojas de seguridad.
 - Hoja de seguridad azufre OSHA.

HOJA DE SEGURIDAD AZUFRE

SECCIÓN I. IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO QUÍMICO

Conocido	Azufre
Químico:	
Sinónimo:	Sulfuro, Azufre
Fórmula	S
Químico:	
Número del Cas:	7704-34-9

SECCIÓN II. COMPOSICIÓN E INFORMACIÓN SOBRE LOS INGREDIENTES

Conocido Químico	Número del Cas	%	Osha	ACGIH
Azufre	7704-34-9	100%	No establecido	No establecido

Puesto que no se ha establecido ningún límite de la exposición para el azufre por OSHA y ACGIH, recomendamos que nuestro producto se deba tratar como polvo molesto 15 mg/m³.

SECCIÓN III. IDENTIFICACIÓN DE LOS PELIGROS

Efectos De Salud Agudos	La irritación a la piel y a los ojos cuando se tiene contacto. La inhalación causará la irritación a los pulmones y a la membrana mucosa. La irritación a los ojos causará el lagrimeo y enrojecimiento. El enrojecimiento, el descamarse y la comezón son características de la inflamación de la piel. Siga las prácticas seguras de la higiene industrial y use siempre el equipo protector al manejar este compuesto. Este producto no tiene ningún efecto crónico sabido. La exposición repetida o prolongada a este compuesto, no se tiene conocimiento que pueda agravar las condiciones médicas.
Efectos De Salud Crónicos:	Este producto no está enumerado por NTP, IARC ni es regulado como agente cancerígeno por OSHA.
Cancerígeno:	

SECCIÓN IV. MEDIDAS DE PRIMEROS AUXILIOS

Primeros auxilios para Ojos:	En caso de contacto, limpie inmediatamente los ojos con abundante agua por lo menos durante 15 minutos. Llamar al médico.
Primeros auxilios Para La Piel:	En caso del contacto con la piel lavar con agua. La ropa se debe lavar antes de la reutilización. Llame al médico si ocurre la irritación.
Primeros auxilios Para La Inhalación:	Si fue inhalado, pasarse al aire fresco. Si no se puede respirar dé respiración artificial. Si la respiración sigue siendo difícil, dé oxígeno. Llame a médico.
Primeros auxilios Para La Ingestión:	Si fue tragado, llamar inmediatamente al médico.

SECCIÓN V. DATOS DEL FUEGO Y DE LA EXPLOSIÓN

Flamabilidad:	No – Flamable	Auto – Encendido	478 – 511°F
Punto De destello:	No aplicable	Límites De	
Medios de Extinción:	Agua, espuma o arena	Flamabilidad:	No aplicable

Los derretimientos y los flujos de azufre al quemarse y emiten grandes cantidades de dióxido de azufre, el cual es altamente tóxico, que provoca irritación y sofocación. No ingresar al lugar donde haya fuego sin el equipo protector apropiado incluyendo la mascarilla respiradora. En caso de fuego, los bomberos deberán utilizar una mascarilla que cubra toda la, y equipo auxiliar para respirar (sistema de aire Scott o equivalente) y ropa protectora conveniente. Enfriar el área donde haya fuego con el inyector de niebla, el fuego puede reencender si la masa ardiente no se refresca debajo de 300°F (140°C).

El peligro primario en la manipulación del azufre pulverizado es que el polvo del mismo que está suspendido en el aire enciende fácilmente y produce explosiones en áreas confinadas. Las fuentes para el encendido pueden ser: calor, fricción, sulfuro pirofórico y la electricidad estática internamente generada. Una explosión pequeña inicial puede crear explosiones más grandes subsecuentes si en alguna parte de la bodega se encuentran o contiene residuos polvosos, como pueden ser las vigas o armazones. Una explosión del azufre producirá dióxido de azufre, que es un gas tóxico.

CONCENTRACIÓN EXPLOSIVA MINIMA: 0,350 gms/m³
ENERGÍA MINIMA DE LA CHISPA PARA LA IGNICIÓN: 15 millijoules

SECCIÓN VI. MEDIDAS POR DERRAME ACCIDENTAL

*Procedimientos del
derramamiento o del escape:*

Utilice ropa protectora y equipo recomendados. Limpie los derramamientos de una manera que no disperse el polvo en el aire. El área del derramamiento se puede lavar con agua. Recoja el agua utilizada para su destrucción. Evite que se mezcle con las aguas del subsuelo y ríos.

Método para la Destrucción:

La destrucción debe hacerse de acuerdo a las regulaciones federales, estatales y locales existentes.

SECCIÓN VII. MANEJO Y ALMACENAJE

Temperaturas Del Almacén:

Medio Ambiente

Vida Útil:

Ilimitado en envase firmemente cerrado.

Sensibilidad Especial:

Ninguno

Precauciones De Manejo/

Almacenaje:

Evite de respirar el polvo. Evite el contacto en ojos o en piel. Lávese a fondo después de su manejo.

Almacene en un lugar seco lejos de la luz del sol directa, del calor y de materiales incompatibles (véase la sección X). Reselle los envases inmediatamente después del uso. Almacene lejos del alimento y de las bebidas.

SECCIÓN VIII. CONTROLES A LA EXPOSICIÓN / PROTECCIÓN PERSONAL

Protección para los Ojos:

Gafas de seguridad o anteojos.

Protección para la Piel:

Guantes del PVC para los cargadores, delantal o batas impermeables. Todos los empleados deben lavarse las manos y la cara antes de comer, de beber o de usar productos del tabaco.

Respirador:

Las concentraciones dentro del lugar de trabajo deben ser supervisadas y si se excede el límite recomendado de exposición, se debe utilizar un respirador aprobado.

Ventilación:

Utilice buena ventilación en el local para evitar el problema de la polvareda, para mantener niveles del aire debajo del límite recomendado de exposición.

Medidas Protectoras

Adicionales:

Las duchas de la emergencia y estaciones para el lavado de ojos, deben estar disponibles. Entrene a los empleados para el uso seguro y en el manejo de productos químicos peligrosos.

SECCIÓN IX. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS

Forma Física:

Polvo

Color:

Amarillo

Olor:

Inodoro al olor leve

Peso Molecular:

32.06

Punto de Ebullición:

832°F (444°C)

Punto De

Fusión/Congelación:

242 - 251°F

Solubilidad En Agua:

Insoluble

Peso Específico:

2.04 - 2.07

SECCIÓN X. ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

Estabilidad:

Estable bajo condiciones ordinarias de uso y almacenaje.

Polimerización Peligrosa:

No ocurrirá

Incompatibilidades:

El azufre es un reactivo moderado. Las mezclas con cloratos, nitratos u otros oxidantes pueden ser explosivos. Puede reaccionar con la evolución del calor con los metales pesados, con los carburos y fósforos.

Condiciones Inestables:

Temperaturas excesivas (véase las incompatibilidades).

Temperatura De la

Descomposición:

No se descompone.

Productos De la

Descomposición:

El azufre al quemarse forma el dióxido de azufre, un gas tóxico. Si reacciona con los materiales de hidrocarburo, produce hidrosulfuro y bisulfuro de carbono - ambos gases tóxicos, mortales y explosivos.

SECCIÓN XI. INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

Número RTECS:

WS4250000

Rutas para la exposición:

Por los ojos, ingestión. Inhalación. Contacto con la piel.

Datos de Toxicidad:

1H-Mam LC50: 1660 mg/m³

Efectos Tóxicos Crónicos:



Este producto no tiene ningún efecto crónico sabido. La exposición repetida o prolongada a este compuesto, no se tiene conocimiento que pueda agravar las condiciones médicas.

Efectos Tóxicos Agudos:

Irritación a la piel y a los ojos cuando se tiene contacto. La inhalación causará la irritación a los pulmones y a la membrana mucosa. La irritación a los ojos causará el lagrimeo y enrojecimiento. El enrojecimiento, el descamarse y la comezón son características de la inflamación de la piel. Siga las prácticas seguras de la higiene industrial y use siempre el equipo protector al manejar este compuesto.

SECCIÓN XII. INFORMACIÓN ECOLÓGICA			
Eco toxicidad:	No disponible en este tiempo		
SECCIÓN XIII. PROCEDIMIENTOS DEL DERRAMAMIENTO Y DEL ESCAPE			
Procedimientos Del Derramamiento O Del Escape:	Utilice la ropa protectora y el equipo recomendados. Limpie los derramamientos de una manera que no disperse el polvo en el aire. El área del derramamiento se puede lavar con agua. Recoja el agua utilizada para su destrucción. Evite que se mezcle con las aguas del subsuelo y ríos.		
Método De la Disposición Inútil:	La disposición inútil debe estar de acuerdo con existir federal, estado y regulaciones ambientales locales.		
SECCIÓN XIV. INFORMACIÓN DEL TRANSPORTE			
Nombre Apropiado Del Envío:	Azufre	Clase:	N/A
Número ONU:	N/A	Etiqueta DOT:	N/A
P.G.:	N/A		
SECCIÓN XV. INFORMACIÓN REGULADORA			
Estado Osha:	Este producto es peligroso bajo criterios del estándar federal 29 CFR 1910,1200 de la comunicación del peligro del OSHA.		
Inventario Químico de TSCA:	Este compuesto está en la lista tóxica del inventario del acto del control de la sustancia de EPA (TSCA)		
Asunto 65 De California:	Al mejor de nuestro conocimiento, este producto no contiene ningún nivel de las sustancias mencionadas, que el estado de California ha encontrado para causar el cáncer, defectos del nacimiento o a otros efectos reproductivos.		
Título III de SARA:	Sección 302 Sustancias Extremadamente Peligrosas: Ninguno Sección 311/312 Categorías Del Peligro: Ninguno Sección 313 Productos químicos Tóxicos: Ninguno		

- Hoja de seguridad internacional del azufre.

Fichas Internacionales de Seguridad Química			
AZUFRE		ICSC: 1166	
 <p style="text-align: center;"> AZUFRE Flor de azufre S Masa atómica: 32.1(véanse Notas) </p> <p> N° CAS 7704-34-9 N° RTECS WS4250000 N° ICSC 1166 N° NU 1350 </p> 			
TIPOS DE PELIGRO/ EXPOSICION	PELIGROS/ SINTOMAS AGUDOS	PREVENCION	PRIMEROS AUXILIOS/ LUCHA CONTRA INCENDIOS
INCENDIO	Combustible.	Evitar las llamas, NO producir chispas y NO fumar.	Agua pulverizada, espuma, polvo, arena seca.
EXPLOSION	Las partículas finamente dispersas forman mezclas explosivas en el aire.	Evitar el depósito del polvo; sistema cerrado, equipo eléctrico y de alumbrado a prueba de explosión del polvo. Evitar la generación de cargas electrostáticas (por ejemplo, mediante conexión a tierra).	En caso de incendio: mantener fríos los bidones y demás instalaciones rociando con agua.
EXPOSICION		¡EVITAR LA DISPERSION DEL POLVO!	
• INHALACION	Sensación de quemazón, tos, dolor de garganta.	Extracción localizada o protección respiratoria.	Aire limpio, reposo, posición de semincorporado y proporcionar asistencia médica.
• PIEL	Enrojecimiento.	Guantes protectores.	Quitar las ropas contaminadas, aclarar la piel con agua abundante o ducharse.
• OJOS	Enrojecimiento, dolor, visión borrosa.	Gafas ajustadas de seguridad.	Enjuagar con agua abundante durante varios minutos (quitar las lentes de contacto si puede hacerse con facilidad) y proporcionar asistencia médica.
• INGESTION	Sensación de quemazón, diarrea.	No comer, ni beber, ni fumar durante el trabajo.	Enjuagar la boca y proporcionar asistencia médica.
DERRAMAS Y FUGAS		ALMACENAMIENTO	ENVASADO Y ETIQUETADO
Barrer la sustancia derramada e introducirla en un recipiente si fuera necesario, humedecer el polvo para evitar su dispersión. (Protección personal adicional: respirador de filtro P2 contra partículas nocivas).		A prueba de incendio. Separado de oxidantes fuertes.	Clasificación de Peligros NU: 4.1 Grupo de Envasado NU: III
VEASE AL DORSO INFORMACION IMPORTANTE			
ICSC: 1166		Preparada en el Contexto de Cooperación entre el IPCS y la Comisión de las Comunidades Europeas © CCE, IPCS, 2005	